

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Disertační práce

k získání akademického titulu PhD v oboru

Elektroenergetika

**Využití termodynamického cyklu
tepelného čerpadla pro zvýšení účinnosti
fotovoltaických panelů**

Školitel: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc. Dr.h.c.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě práci ke státní doktorské zkoušce zpracovanou během mého doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

Podpis:.....

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat mému školiteli Prof. Ing. Zdeňkovi Vostrackému, DrSc., Ing. Aleši Krutinovi a celému kolektivu pracovníků Katedry elektroenergetiky a ekologie za poskytnutí cenných rad a pracovního prostředí.

Poděkování patří především mým blízkým a mé rodině, která mě po celou dobu mého dosavadního studia podporovala.

Využití termodynamického cyklu tepelného čerpadla pro zvýšení účinnosti fotovoltaických panelů

Abstrakt:

Tato práce je zaměřena na analýzu provozních stavů vzniklých spoluprací termodynamického cyklu tepelného čerpadla a fotovoltaického (FV) panelu. Vhodným dimenzováním obou prvků pak může docházet k úspoře nákladů při provozu tepelného čerpadla a zároveň ke zvýšení účinnosti přeměny sluneční energie na energii elektrickou při snižování teploty FV panelu. Tyto poznatky poslouží k návrhu aplikace systému například v oblasti bytových domů nebo v komerční sféře.

Klíčová slova:

Tepelné čerpadlo, topný faktor, fotovoltaický článek, účinnost fotovoltaického článku, tepelná ztráta

75 stran

54 obrázků

9 tabulek

Utilization of heat pump thermodynamic cycle for increasing efficiency of photovoltaic modules

Abstract:

This thesis deals with the analysis of operating conditions resulting from cooperation of thermodynamic cycle of a heat pump and photovoltaic (PV) panel. Appropriate sizing of these elements can lead to a cost-saving heat pump and also to an increase of the efficiency of solar energy conversion to electricity by reducing of temperature of the PV panel. These findings could be used for design of applications in areas such as apartment buildings or commercial sphere.

Keywords:

Heat pump, coefficient of performance, solar cell, solar cell efficiency, heat loss

75 pages

54 figures

9 tables

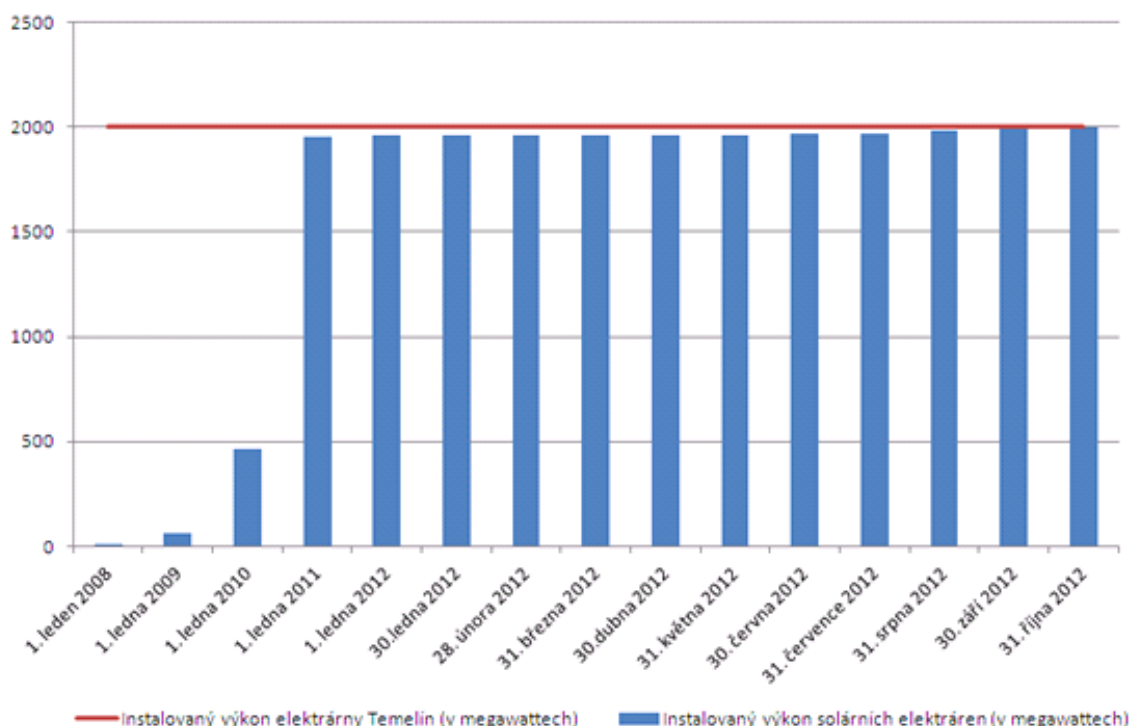
Obsah

1. Úvod	8
2. Popis fotovoltaické technologie	10
2.1. Teoretický popis fotovoltaického jevu	10
2.2. Účinnost fotovoltaických článků.....	12
2.3. Teoretický model solárních podmínek na území ČR	16
2.4. Skutečné solární podmínky na území ČR.....	18
3. Teoretický popis tepelného čerpadla	20
3.1. Základní princip tepelného čerpadla	20
3.2. Komponenty okruhu tepelného čerpadla	21
3.2.1. Chladivo.....	21
3.2.2. Výparník	23
3.2.3. Kompresor.....	24
3.2.4. Kondenzátor.....	27
3.2.5. Expanzní ventil	29
3.2.6. Výpočet základních provozních parametrů tepelného čerpadla.....	31
4. Popis konstrukce experimentálního modelu	33
5. Postup měření na experimentálním modelu	36
6. Výsledky experimentu	38
6.1. Zatěžovací odpor R 200 Ω	38
6.2. Zatěžovací odpor R 1000 Ω	39
6.3. Zatěžovací odpor R 1500 Ω	41
6.4. Zatěžovací odpor R 2100 Ω	42
6.5. Vyhodnocení naměřených dat	43
7. Tepelný model fotovoltaického panelu	46
7.1. Tepelná kapacita panelu.....	46
7.2. Přestup tepla krátkovlnným zářením	47
7.3. Přestup tepla dlouhovlnným zářením	48

7.4.	Přestup tepla prouděním.....	49
7.5.	Vyrobená elektrická energie.....	49
7.6.	Teoretický model teploty FV panelu	50
8.	Návrh integrovaného systému s TČ pro využití v praxi	52
9.	Ekonomicko-technické hodnocení na základě simulace	54
9.1.	Definování vstupních parametrů simulace.....	54
9.2.	Porovnání výsledků simulace referenčních dnů 20. prosince 2010 a 2. srpna 2010	56
9.3.	Porovnání ekonomiky provozu v průběhu celého roku	63
10.	Závěr	65
11.	Literatura	67

1. Úvod

Od roku 2009 do konce roku 2010 došlo v České republice k obrovskému nárůstu instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren (dále jen „FVE“). V následujících letech se trend navyšování instalovaného výkonu FVE snížil a další přírůstek byl minimální. Instalovaný výkon FVE tak v loňském roce dosáhl celkového výkonu obou bloků jaderné elektrárny Temelín.



Obr. 1.1 Instalovaný výkon fotovoltaických elektráren na území ČR [6]

K takto masivnímu nárůstu došlo především díky podpoře státu ve formě dotací a příslibu fixace výkupní ceny na předem stanovené období. Vzhledem k ukončení této státní podpory k 31.12.2011 se již další zvyšování instalovaného výkonu nepředpokládá.

Cílem stávajících provozovatelů FVE, především těch, kteří budou využívat vyrobenou elektrickou energii pro vlastní spotřebu, ale i těch, kteří tuto energii dodávají přímo do distribuční sítě, je pokus o co nejefektivnější využití takto zcela zdarma získané elektřiny. Zároveň by však měli mít zájem na tom, aby jejich stávající fotovoltaické (dále jen „FV“) panely měli co nejvyšší účinnost, pro jejich maximální využití.

Tato práce si neklade za úkol hodnotit vliv tohoto neřízeného zdroje elektrické energie na distribuční síť či poukazovat na zvýšený podíl položky obnovitelných zdrojů na cenotvorbě

1 MWh elektřiny pro koncového zákazníka. Rád bych se soustředil na zefektivnění využití potenciálu dopadajícího slunečního záření na zemský povrch, a to nejen po přeměně na energii elektrickou, ale i na energii tepelnou.

Následující práce se bude neformálně dělit na dvě části, z nichž první bude zaměřena na výrobu elektrické energie pomocí FV panelů a s tím spojený i popis, základní principy a přehled nejčastěji využívaných systémů. Druhá část je věnována využití tepelné energie, produkované FV články a na zvýšení topného faktoru (dále jen „COP“) tepelného čerpadla vlivem nárůstu nízkopotenciálního tepla na straně výparníku. Vhodnou kombinací uvedených dvou částí pak lze dosáhnout synergického efektu, při kterém kromě zvýšení COP tepelného čerpadla, dojde při odebrání tepelné energie z FV článků i k nárůstu jejich účinnosti, jak je teoreticky popsáno například v [1].

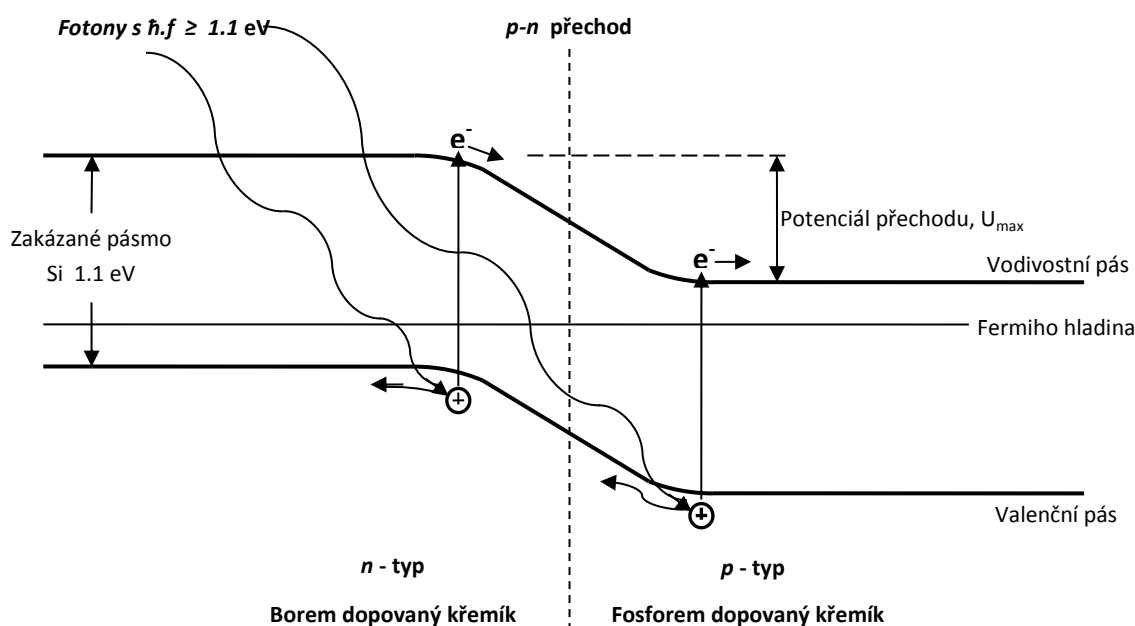
V současné době není možné v dostupné literatuře dohledat obdobnou publikaci na téma spojení těchto dvou fyzikálních principů. Tímto tématem jsem se začal zabývat během svého studia na Brunel University v Londýně.

2. Popis fotovoltaické technologie

Tato část práce bude zaměřena na teoretický popis základního principu FV článku a zároveň přehled v současnosti nejčastěji využívaných technologií. Kapitola je doplněna o popis slunečních podmínek na území ČR.

2.1. Teoretický popis fotovoltaického jevu

Základním prvkem dnes nejvíce používaných FV článků je křemík. Každý atom čistého křemíkového krystalu má čtyři valenční elektrony, které sdílí s okolními atomy v kovalentní vazbě. Pokud je takový krystal dopován určitou příměsí, jako například fosforem, který zabírá stejné místo v krystalové mřížce, ale má pět valenčních elektronů, pak každý atom tohoto krystalu bude mít jeden nadbytečný valenční elektron. Při zvýšení tepelné energie se většina přebytečných elektronů oddělí od atomu fosforu a mohou se tak pohybovat volně po celém krystalu. Krystal se tím stává tzv. elektronově vodivým. Tímto způsobem je tvořen polovodič typu *n*.



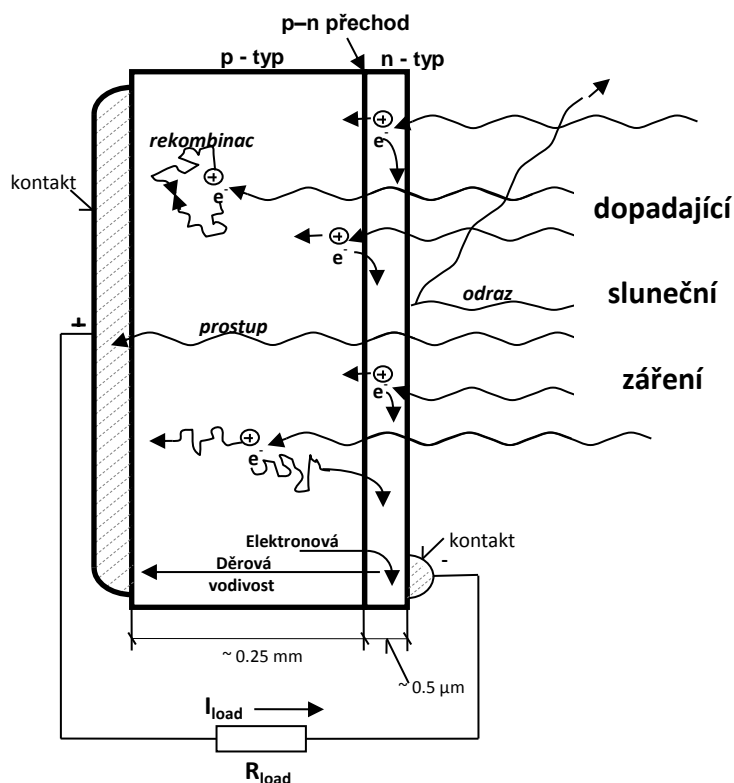
Obr. 2.1 Pásmová struktura p-n přechodu v křemíkovém solárním článku [2]

Pokud je krystal křemíku podobně dopován např. borem, který má pouze tři valenční elektrony, bude v blízkosti atomu boru vždy jeden elektron chybět pro úplnou kovalentní vazbu. Místo v krystalické mřížce, které normálně zabírá elektron, se pak bude jevit jako kladně nabitě. Tento chybějící elektron (díra) je nosičem pozitivního náboje a po tepelném

oddělení z atomu boru se může rovněž volně pohybovat po krystalu. Vzniká tedy tzv. děrová vodivost a tedy polovodič typu p . Vzhledem k tomu, že částice s pozitivním nábojem vyváží záporně nabitě valenční elektrony v p i n polovodiči, nedojde k porušení rovnováhy náboje uvnitř ani na povrchu krystalu.

Pokud jsou polovodiče typu p a n spojeny v dokonalý krystal, mohou pak elektrony z oblasti n přecházet přes přechod p - n do oblasti typu p . V opačném směru pak přecházejí díry z p do n oblasti, dokud nedojde ke vzniku napětí daného sumou difuzních potenciálů děr a elektronů. Tím je vytvořeno permanentní elektrické pole, které brání dalšímu přenášení nosičů náboje.

Výsledná elektronová struktura je schematicky naznačena na Obr 2.2. Z důvodu toku elektronů a děr dojde v p - oblasti ke zvýšení energetických hladin valenčního a vodivostního pásu. Fermiho hladina, představující elektrochemický potenciál, byla původně výše v n - oblasti a posunem energetických pásem v p - oblasti dojde k jejímu vyrovnání uvnitř krystalu a na p - n přechodu. Oblast p pak obsahuje neúměrné množství elektronů a je na vyšším záporném potenciálu, což vede ke vzniku elektrického pole na přechodu p - n .



Obr. 2.2 Schématické znázornění světelných interakcí a toku fotoelektrického proudu v křemíkovém článku [3]

Pokud na krystal dopadne světlo s energií větší než je šířka zakázaného pásma, může být absorbováno valenčními elektrony. Ty jsou pak vlivem dodané energie vybuzeny do vodivostního pásu a zanechají za sebou ve valenčním pásu volný elektronový stav (díru). Pod vlivem elektrického pole jsou vybuzené elektrony vtahovány do stavu s nižší energií v n -oblasti, zatímco díry jsou usměrňovány do p – oblasti, které pro ně představuje nižší energetický stav. Fotonosiče se tak přemísťují do příslušných oblastí krystalu, kde jsou majoritními nosiči náboje, čímž dojde k vytvoření napětí na krystalu. Po připojení externí zátěže může tedy začít protékat proud.

Po výpočtu je zřejmé, že v křemíkovém článku se na přeměně v elektřinu podílejí pouze ty fotony, jejichž vlnová délka je menší nebo rovna 1,116 μm . Při této vlnové délce se přeměňuje 100 % dopadajících fotonů.

2.2. Účinnost fotovoltaických článků

Ne všechny fotony dopadající na krystal však způsobí nárůst proudu I_{load} v zátěži. Při přeměně slunečního záření na elektřinu se objevuje řada ztrátových procesů. Z celého spektra slunečního záření jsou absorbovány pouze fotony se stejnou nebo vyšší energií než je rozdíl mezi energetickými hladinami vodivostního a valenčního pásma (1.1 eV pro Si) [3].

$$E = \hbar \cdot f = \hbar \frac{c}{\lambda} [eV; Js, s^{-1}, ms^{-1}, m] \Rightarrow E = \frac{1,2395}{\lambda} [eV; \mu m] \quad (2.1)$$

kde E ... šířka zakázaného pásma [eV]

\hbar ... Planckova konstanta [Js]

f ... frekvence [s^{-1}]

c ... rychlost světla [m/s]

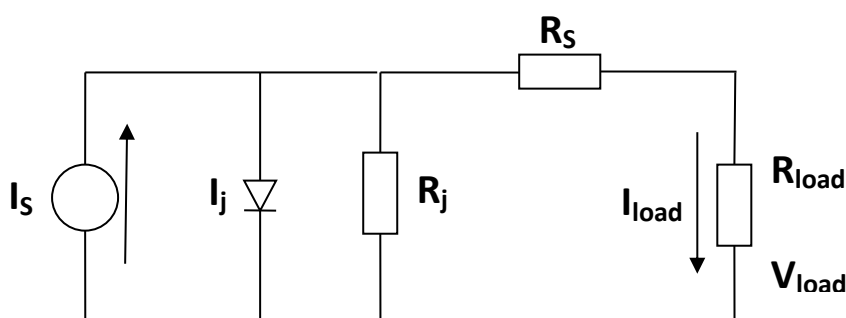
λ ... vlnová délka světla [m]

Toto množství se pohybuje okolo 80 % dopadajícího světla (pro Si). Pro ostatní materiály fotovoltaických článků je možné spočítat příslušné vlnové délky podle následujícího vztahu:

Materiál	Zakázané pásmo [eV]	λ [μm]	Materiál	Zakázané pásmo [eV]	λ [μm]
Si	1,11	$\geq 1,117$	CuInTe2	0,9	$\geq 1,377$
SiC	2,6	$\geq 0,477$	InP	1,27	$\geq 0,976$
CdAs2	1	$\geq 1,240$	In2Te3	1,2	$\geq 1,033$
CdTe	1,44	$\geq 0,861$	In2O3	2,8	$\geq 0,443$
CdSe	1,74	$\geq 0,712$	Zn3P2	1,6	$\geq 0,775$
CdS	2,42	$\geq 0,512$	ZnTe	2,2	$\geq 0,563$
CdSnO4	2,9	$\geq 0,427$	ZnSe	2,6	$\geq 0,477$
GaAs	1,4	$\geq 0,885$	AlP	2,43	$\geq 0,510$
GaP	2,24	$\geq 0,553$	AlSb	1,63	$\geq 0,760$
Cu2S	1,8	$\geq 0,689$	As2Se3	1,6	$\geq 0,775$
CuO	2	$\geq 0,620$	Sb2Se3	1,2	$\geq 1,033$
Cu2Se	1,4	$\geq 0,885$	Ge	0,67	$\geq 1,850$
CuInS2	1,5	$\geq 0,826$	Se	1,6	$\geq 0,775$
CuInSe2	1,01	$\geq 1,227$			

Tabulka 2.1 Energie zakázaného pásma a rozsahy vlnových délek jednotlivých typů FV článků [3]

Fotovoltaický článek je možné reprezentovat následujícím ekvivalentním elektrickým obvodem:



Obr. 2.3 Náhradní schéma FV článku [3]

- kde I_s ... celkový oddělený náboj
 I_j ... proud rozptýlený na p-n přechodu
 I_{load} ... proud zátěží
 R_j ... rozptylová rezistence p-n přechodu
 R_s ... sériový odpor FV článku
 R_{load} ... odpor zátěže
 U_{load} ... napětí na zátěži, resp. na článku

Maximální dosažitelné napětí U_{\max} je stejné jako napětí obvodu naprázdno, tedy pokud je $R_{\text{load}} = \infty$. Toto napětí tvoří vždy pouze část napětí zakázaného pásma při pokojové teplotě. Maximální výkon ideálního solárního článku je tedy dán součinem $P_{\max} = I_s \cdot U_{\max}$. Velikost napětí U_{\max} se zvětšuje s rostoucí šířkou zakázaného pásma, zatímco počet fotonů schopných vytvořit pár elektron - díra klesá, tedy I_s klesá.

Část světla se odrazí od povrchu článku, kvůli rozdílnému indexu odrazu křemíku a vzduchu. Tuto negativní vlastnost je možné téměř zcela odstranit použitím antireflexního povlaku, přičemž ztráty odrazem klesnou pod 3 %, oproti původním 30 %.

Optimální hloubka p - n přechodu uvnitř krystalu je určována faktory jako je vzdálenost od povrchu, kde dochází k největší absorpci fotonů, životnost a hybnost fotonosičů, nebo rezistance vrstvy těsně pod povrchem krystalu, kterou musí projít proud, aby dosáhl předního kontaktu. Tento odpor závisí především na geometrii kontaktní mřížky na přední straně článku. Použití dokonalého krystalu vede k prodloužení života fotonosičů, zabraňuje tak jejich rychlé rekombinaci, a tím i zvýšení šance fotonosičů dosáhnout větší vzdálenosti. Optimální tloušťku krystalu je možné spočítat z absorpční rovnice:

$$N = 1 - e^{-\alpha \cdot d} \quad (2.2)$$

kde N ... podíl absorbovaných fotonů

α ... absorpční koeficient [cm^{-1}]

d ... tloušťka krystalu [μm]

Absorpční koeficient je závislý na vlnové délce dopadajícího světla. Například pro červené světlo s $\lambda = 0.7 \mu\text{m}$ je $\alpha = 2000 \text{ cm}^{-1}$. Po dosazení těchto hodnot do absorpční rovnice získáme optimální tloušťku krystalu $d = 3.5 \mu\text{m}$ pro pohlcení poloviny dopadajících fotonů. Obvykle se křemíkové solární články vyrábějí o tloušťce $250 \mu\text{m}$ s p - n přechodem ve vzdálenosti od $0.5 \mu\text{m}$ do jednotek μm od povrchu krystalu.

Sběrná účinnost je definována jako podíl minoritních nosičů (díry v n – typu, elektrony v p – typu) produkovaných dopadem fotonů, které dosáhnou p – n přechodu. Některé z těchto nosičů prostupují směrem k přechodu, zatímco ostatní se pohybují opačným směrem a rekombinují v objemu krystalu nebo na jeho povrchu. V typickém solárním článku se tato účinnost pohybuje v rozmezí 60 až 80 %.

Dalším ztrátovým činitelem je rezistance velmi tenké vrstvy mezi přechodem a čelním elektrickým kontaktem, kterou musí nosiče procházet. Správná geometrie kontaktu, využití mřížky na místo bodového kontaktu a hloubka $p - n$ přechodu jsou faktory, které musí být vyváženy tak, aby nedocházelo ke ztrátám dopadajícího světla při prostupu čelní vrstvou a ke zhoršení sběrné účinnosti. Tento sériový odpor způsobuje pokles účinnosti o několik procent.

Napětí, které je možné na článku dosáhnout, je závislé na množství minoritních nosičů na obou stranách přechodu. Toto napětí je menší než zakázané pásmo, vzhledem ke ztrátám na přechodu. Napětí na článku roste se vzrůstajícím osvitem až do stavu, kdy minoritní nosiče mají téměř stejnou hustotu jako majoritní nosiče a napětí se tedy blíží energii zakázaného pásma. Nikdy však nemůže překročit tuto hranici, protože potenciál přechodu by byl vynulován. Ve skutečnosti se této hodnotě ani nepřiblíží, protože jakmile by byl tento potenciál vyvážen oddělenými fotonosiči, došlo by k zániku vnitřního elektrického pole a bylo by tedy dosaženo maximálního napětí (napětí otevřeného obvodu), vzhledem k nekonečnému odporu R_{load} (Obr. 2.3). Toto napětí je přímo úměrné energii zakázaného pásma, zatímco ztráta na přechodu s rostoucí energií zakázaného pásma exponenciálně klesá. Tato ztráta klesá i se snižující se teplotou, protože klesá i množství tepelně vybuzených nosičů, které by dosáhli přechodu.

Za předpokladu, že každý foton vygeneruje jeden elektron, pak celkové množství fotonů dopadajících na plochu článku za 1 sekundu, při intenzitě záření I_p , bude [3]:

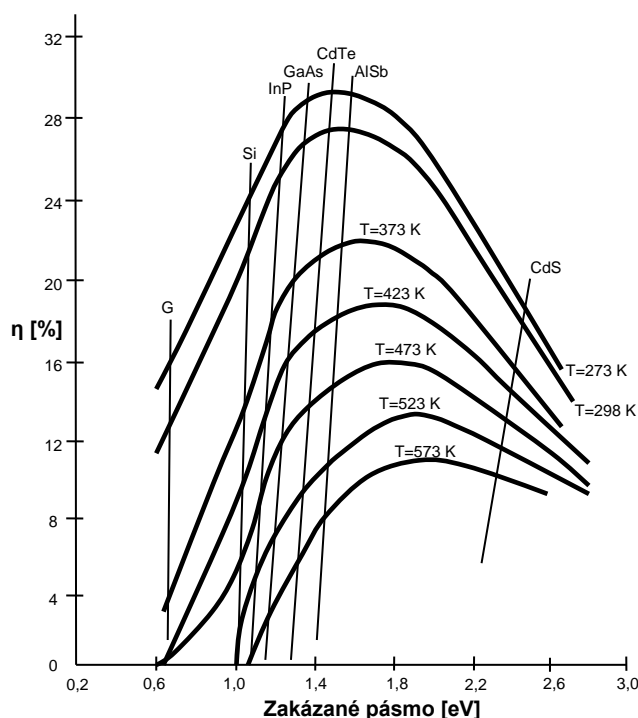
$$N_{ph} = \frac{I_p}{E_p} = \frac{I_p}{\hbar \cdot \frac{c}{\lambda}} \quad (2.3)$$

Pak elektrický výstup bude roven součinu $N_{ph} \cdot (Z.P.)$ (energie Zakázaného Pásma). Z toho pak maximální možná účinnost na dané vlnové délce bude [3]:

$$\eta_{max} = \frac{N_{ph} \cdot (Z.P.)}{N_{ph} \cdot E_p} = \frac{Z.P.}{E_p} \quad (2.4)$$

Zobrazené účinnosti na Obr. 2.4 nezahrnují jakékoliv ztráty odrazem, prostupem, resistencí článku nebo neideální $p-n$ přechod. Z grafu je patrné, že účinnost článku je silně závislá na jejich teplotě. Například pro kadmium teluridový článek klesne účinnost zhruba na polovinu

při nárůstu teploty na 200 °C. Je patrný i energetický posun zakázaného pásma, rovněž způsobený zvyšující se teplotou.



Obr. 2.4 Maximální teoretická účinnost solárních článků v závislosti na šířce zakázaného pásma a teplotě [2]

Zvýšení účinnosti fotovoltaického panelu vychází z předpokladu, že s klesající teplotou fotovoltaického článku se zvětšuje rozptylová rezistance a tím klesá rozptylový (ztrátový) proud na p-n přechodu. Maximální napětí U_{\max} na článku se tedy zvyšuje s narůstající teplotou. Je tedy zřejmé, že se bude zvyšovat i maximální výkon P_{\max} daný jako součin maximálního proudu a napětí.

Zahřívání fotovoltaického článku je převážně způsobeno pohlcováním fotonů s energií přesahující šířku zakázaného pásma, která u křemíkových článků odpovídá hodnotě 1,1 eV. Absorbují se tedy vlnové délky kratší než 1,116 μm , což představuje zhruba 80 % dopadající sluneční energie.

2.3. Teoretický model solárních podmínek na území ČR

Množství dopadající sluneční energie na zemský povrch je závislé na faktorech, jako jsou datum, čas a zeměpisná šířka uvažovaného místa. Výpočet uvedený v této kapitole slouží pro porovnání s reálnými naměřenými daty.

Sluneční záření G_0 na vodorovném povrchu zemské atmosféry je definováno jako [1]:

$$G_o = 1367 \cdot \left[1 + 0,33 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \cos \theta_z \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.5)$$

kde n ... pořadový den roku (1. leden je brán jako 1)

θ_z ... úhel zenitu

Úhel zenitu je svíráán přímkou spojující střed zeměkoule se středem slunce a přímkou kolmou k zemskému povrchu, procházející uvažovaným místem

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \varpi + \sin \phi \cdot \sin \delta \quad (2.6)$$

kde ϕ ... zeměpisná šířka (úhel mezi rovinou procházející rovníkem a přímkou kolmou k zemskému povrchu, procházející uvažovaným místem

δ ... deklinace – úhel, který svírají dopadající sluneční paprsky s rovinou procházející rovníkem ve slunečním poledni (moment, kdy je slunce nejvýše na obloze)

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \frac{360}{365,24} (n + 284) \quad (2.7)$$

kde ω ... hodinový úhel – definován jako úhel oblouku na zemském povrchu mezi poledníkem obsahujícím uvažovaný bod a poledníkem protínajícím spojnicí mezi středem země a slunce:

$$\varpi = (12 - t) \cdot 15^\circ \quad (2.8)$$

kde t ... místní čas v hodinách

Po dosazení (2.6), (2.7), (2.8) do (2.5) získáme přesnou hodnotu solárního osvitu na povrch atmosféry nad daným bodem na povrchu země v určitý čas. Pak celková denní dopadající energie na povrch atmosféry je dána [1]:

$$H_o = 37,595 \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \cdot C \text{ [J]} \quad (2.9)$$

kde

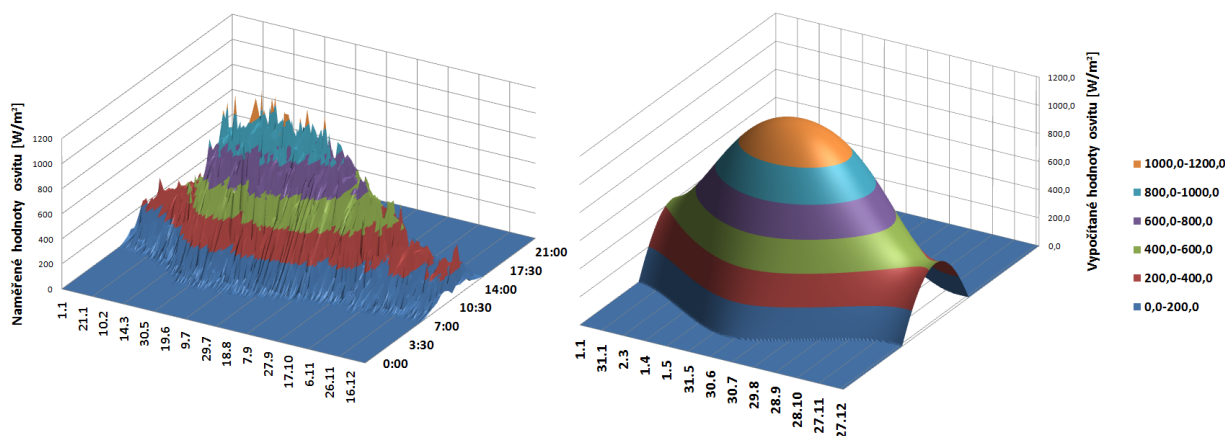
$$C = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega_s}{360} \sin \phi \cdot \sin \delta \quad (2.10)$$

kde ω_s ... úhel západu slunce indikující délku dne

$$\omega_s = -\tan \phi \cdot \tan \delta \quad (2.11)$$

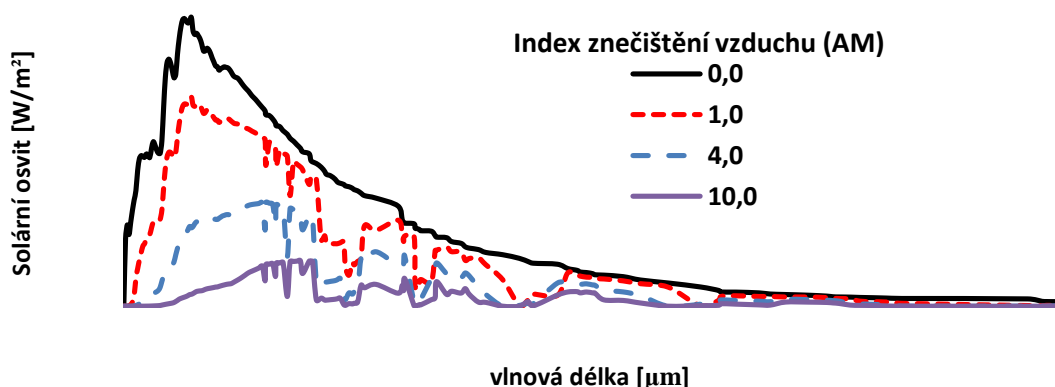
2.4. Skutečné solární podmínky na území ČR

Měření reálných hodnot dopadající sluneční energie a teplot vzduchu bylo provedeno na meteorologické stanici umístěné na elektrotechnické fakultě v časovém horizontu od ledna 2008 do prosince 2009. Tato lokalita má zeměpisnou šířku 49,5° severní šířky. Všechny výpočty z předchozí kapitoly byly provedeny pro tutéž polohu a stejný časový horizont. Porovnání naměřených a vypočtených hodnot je uvedeno na následujícím obrázku:



Obr. 2.5 Porovnání dopadající sluneční energie na povrch atmosféry

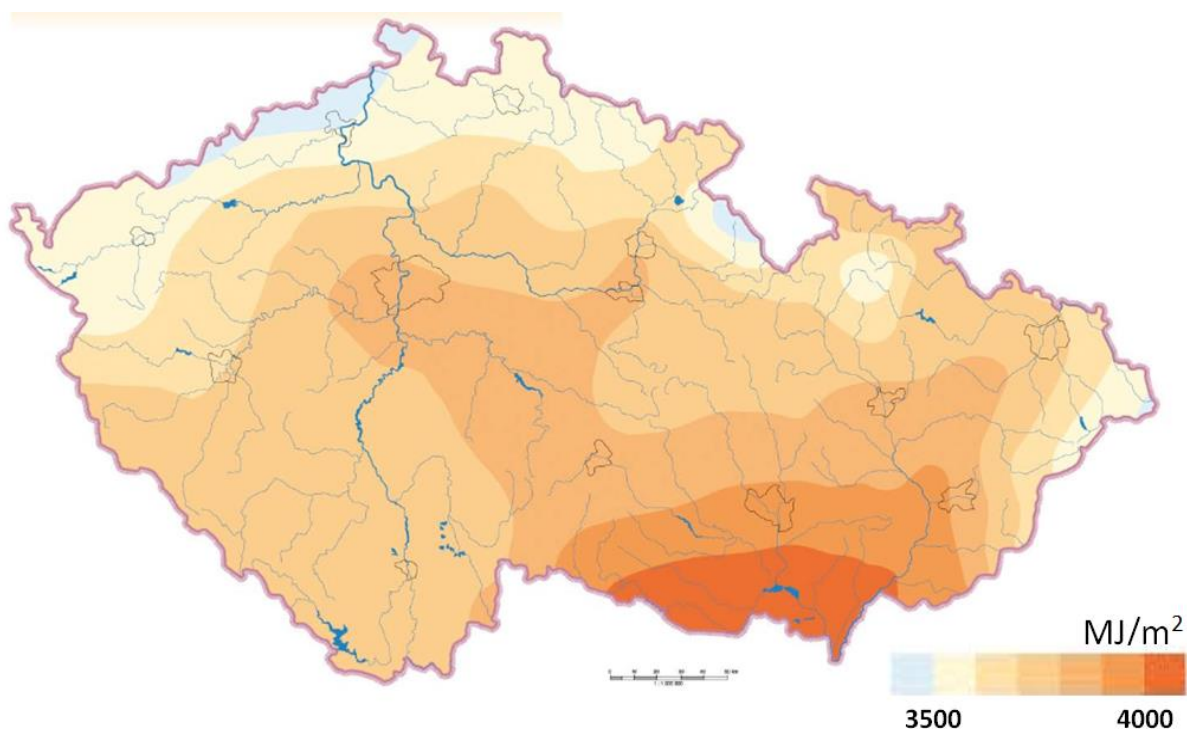
Dopadající sluneční záření na povrch země je do značné míry ovlivňováno oblačností a znečištěním vzduchu. Kromě odrazu od mraků, tlumení nastává i absorpcí v atmosféře. Složení atmosféry neovlivňuje množství energie dopadající na povrch, ale mění solární spektrum.



Obr. 2.6 Sluneční spektrum při různém složení atmosféry [3]

Z předchozího obrázku jsou patrné absorpční špičky v oblasti viditelného světla i nad ní. Tyto špičky jsou způsobeny především vodními parami (pásma – 0,594; 0,652; 0,723; 1,4; 1,85 μm). Ozon absorbuje na 0,36 a 0,6 μm a kyslík na 0,629, 0,688, 0,762 μm . V praxi je zaveden standard v provádění výpočtů a porovnání s indexem znečištění vzduchu s hodnotou 1,5.

Průměrné množství dopadající sluneční energie na území České republiky je znázorněno na následujícím obrázku [12]:



Obr. 2.7 Průměrný roční úhrn doby trvání slunečního svitu [12]

3. Teoretický popis tepelného čerpadla

V této části práce se budu věnovat popisu základního principu konstrukce a termodynamických parametrů tepelného čerpadla. Pro bližší seznámení s teoretickými i skutečnými naměřenými provozními vlastnostmi vezmu jako příklad tepelná čerpadla Convert AW společnosti AC Heating.

3.1. Základní princip tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo (dále jen „TČ“) ve své podstatě tvoří následující základní části:

- **Chladivo** - chladivo proudí v chladícím okruhu a je nuceno se vypařovat při nízkém tlaku a teplotě a kondenzovat při vysokém tlaku a teplotě. Typickým chladivem pro tepelná čerpadla je R 410, které má bod varu při atmosférickém tlaku $-48,5\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- **Výparník** – zde probíhá přestup nízkopotenciálního tepla do pracovní kapaliny. Přivedené teplo způsobuje vypařování chladiva a takto vzniklé páry jsou přiváděny do kompresoru,
- **Kompresor** – vypařované chladivo je nasáváno z výparníku do kompresoru a potom stlačované na vyšší tlak a teplotu, čímž dojde k navýšení energetického obsahu par o práci potřebnou k pohonu kompresoru. Ve většině případů je kompresor poháněn elektromotorem. Většina tepelných čerpadel pro domácí aplikace používá tzv. hermetické kompresory, kde je pohonný elektromotor a kompresor umístěn spolu v hermeticky uzavřeném plášti. Rozdělení nejpoužívanějších kompresorů pro tepelná čerpadla můžeme provést na scrollové a pístové (rotační, dvojité rotační),
- **Kondenzátor** – Horký stlačený plyn chladiva vchází do kondenzátoru – tepelného výměníku, ze kterého je teplo transformováno do teplonosného média (vzduch, voda, nemrznoucí směs). Teplota a tlak chladiva v průběhu kondenzace zůstávají konstantní. Páry chladiva po kondenzaci jsou odváděny do expanzního ventilu,
- **Expanzní ventil** – Expanzní ventil pracuje jako škrtkový ventil transformující tok chladiva do výparníku. Část kapalného chladiva se při tomto procesu vypaří a chladivo se výrazně ochladí (plyn i kapalina).

3.2. Komponenty okruhu tepelného čerpadla

3.2.1. Chladivo

Chladivo cirkuluje přes systém a absorbuje tepelnou energii ve výparníku při nízké teplotě a odvádí tepelnou energii v kondenzátoru při teplotě vysoké. To je realizováno pomocí přeměny chladiva v kapalně fázi na chladivo ve fázi plynné ve výparníku a na kapalinu v kondenzátoru.

Chladiva jsou rozdělena do různých skupin podle chemického složení svých molekul:

CFC Chloro-Fluoro-Carbons - plně halogenované molekuly uhlovodíku (bez vodíku), např. R12

HCFC Hydro-Chloro-Fluoro-Carbons – částečně halogenované uhlovodíky, v molekule zůstal minimálně jeden atom vodíku, například R22

HFC Hydro-Fluoro-Carbons - fluorované uhlovodíky, atomy vodíku jsou nahrazeny fluorem (molekula neobsahuje atomy chlóru)

HC Hydro-Carbons - uhlovodíky (bez atomů chlóru nebo fluóru) jako propan R290 a izobutan R600A

Mezi základní požadavky na chladiva patří:

- ekologicky příznivé (*ne nebezpečné pro okolní prostředí*),
- energeticky efektivní, tedy schopné přenést velké množství tepla na kilogram hmotnosti,
- přednostně nehořlavé,
- přednostně netoxické,
- jednoduše dopravovatelné,
- kompatibilní s oleji a elastomery (*těsnění a o-kroužky*),
- chemicky stabilní.

Je zřejmé, že výše uvedené požadavky nemůže všechny splnit jednoduchá látka.

V případě potřeby výměny by měl být chladicí systém po opravě naplněn originálním chladivem. Výroby některých chladiv vzhledem k jejich nepříznivému ekologickému dopadu ale byly již zastaveny (např. R12), z čehož vyplývá nutnost použít při opravách starých zařízení alternativní chladiva. Předtím je ale potřebné zhodnotit stav zařízení a jeho

zbytkovou životnost, protože v mnoha případech je ekonomicky efektivnější koupit nové zařízení než použít staré s alternativním chladivem.

Před výměnou chladiva je potřebné zjistit, zda nové chladivo nebude působit nepříznivě na materiály a komponenty oběhu tepelného čerpadla. Velmi důležitá otázka je také, zda je potřeba vyměnit i mazací olej. Pokud ano, cena náhrady bude podstatně vyšší (starý olej musí být odstraněn ze všech částí systému).

Staré chladivo	Náhrada chladivem
-----------------------	--------------------------

- R12	R134A
- R 502	R 404A
- R22	R 407C

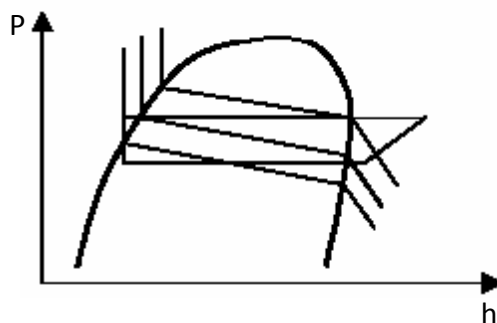
Kromě uvedených náhrad jsou na trhu i další chladiva, které je možné použít jako náhrady metodou „drop-in“ (přímá náhrada starého chladiva bez výměny oleje a případně dalších komponent). Obecně přinášejí tyto zásady změnu tepelného výkonu tepelných čerpadel a proto je to potřeba ozřejmit majiteli zařízení před uskutečněním výměny.

Chladiva lze podle chování v oblasti sytých par rozdělit na azeotropní a zeotropní. Azeotropní chladivo je směs dvou nebo více chladiv, které v azeotropním bodě (při určitém tlaku a koncentraci složek) mají fázi kapalnou i plynnou (parní) v termodynamické rovnováze, tedy mají vlastnosti čistého chladiva. Zeotropní směsi chladiv jsou směsí složek, kde parní a kapalná není v rovnováze, při žádných podmínkách (teplota, tlak, koncentrace).

Zeotropní směsi chladiv mají na rozdíl od azeotropních chladiv tzv. „teplotní skluz“ což znamená, že různé složky směsi kondenzují při rozdílné teplotě – složka s nejnižší výparnou teplotou a nejvyšším výparným tlakem vře při vypařování chladiva první (například chladiva s velkým teplotním skluzem je možné uvést R 407 C). Doplnování chladiva musí být pak vykonáváno v kapalně fázi, aby byly zabezpečeny potřebné koncentrace jednotlivých složek.

V logaritmickém p-h diagramu pak izotermy zeotropního chladiva nejsou v oblasti mokré páry (mezi mezními křivkami) totožné s izobarami (nejsou kolmé na osu tlaku) jak je tomu u čistých chladiv nebo azeotropních roztoků, ale probíhají jako přímky se snižující se hodnotou tlaku, jak je to znázorněno na Obr. 3.1.

Problém teplotního skluzu ukládá na návrháře, výrobce a servisní organizace vysoké požadavky pro dosažení optimálních provozních podmínek tepelných čerpadel.



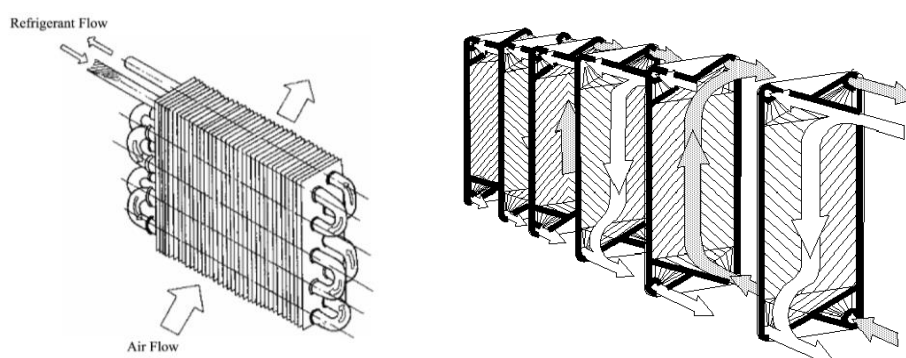
Obr. 3.1 Teplotní skluz v logaritmickém $p - h$ diagramu

3.2.2. Výparník

Funkcí výparníku je získávat teplo z nízkopotenciálního zdroje (vzduch, voda, hornina) a transformovat jej do chladiva za účelem jeho vypaření. Výparná teplota musí být samozřejmě nižší než teplota zdroje tepla.

Tepelná čerpadla vzduch-voda a vzduch-vzduch absorbují teplo do výparníku přímo ze vzduchu. Je to baterie měděných potrubí s hliníkovými lamelami a ventilátorem, který rozvádí vzduch přes hliníková žebra.

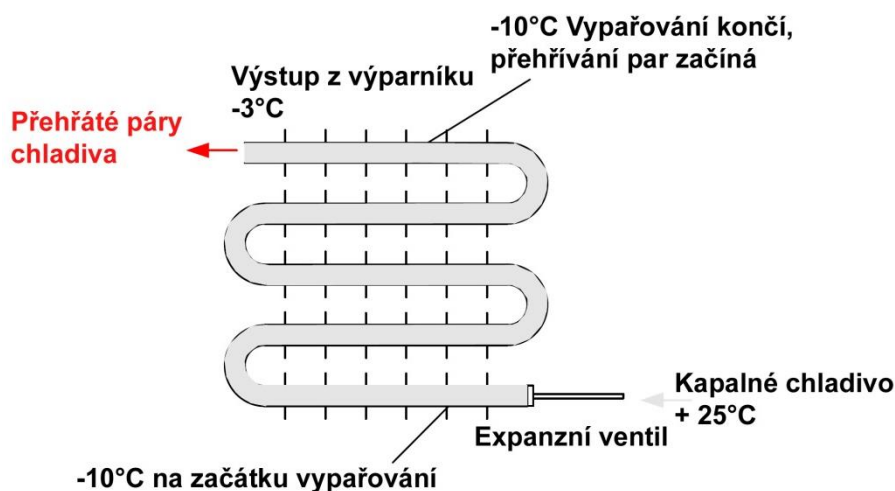
V tepelných čerpadlech voda-voda a solanka-voda jsou prakticky všechny výměníky tepla v současnosti konstruovány jako deskové výměníky, které jsou ekonomické, kompaktní a šetří prostor.



Obr. 3.2 Různé typy kompaktních deskových pájených výměníků tepla

Kapalné chladivo, které vstupuje do expanzního ventilu, je expandováno na výparný tlak. Část kapalného chladiva je vypařena již před vstupem do výparníku. Množství vypařeného chladiva stoupá, pokud stoupá teplotní nebo tlakový rozdíl mezi kondenzátorem

a výparníkem. Na začátku výparníku je tedy vždy směs páry a kapaliny s různou frakcí páry. Je důležité, aby plyn chladiva byl přehřátý před tím, než vstoupí do kompresoru, aby neobsahoval žádné kapky kapaliny, které by mohly poškodit kompresor. Plynné chladivo může být přehříváno nad výparnou teplotu v konečné části výparníku, jak je znázorněno na Obr. 3.3. Ve většině případů je efektu přehřívání chladiva vstupujícího do kompresoru dosahováno pomocí vnitřního výměníku tepla mezi horkým kapalným chladivem vystupujícím z kondenzátoru a nasávaným chladivem z výparníku do kompresoru.



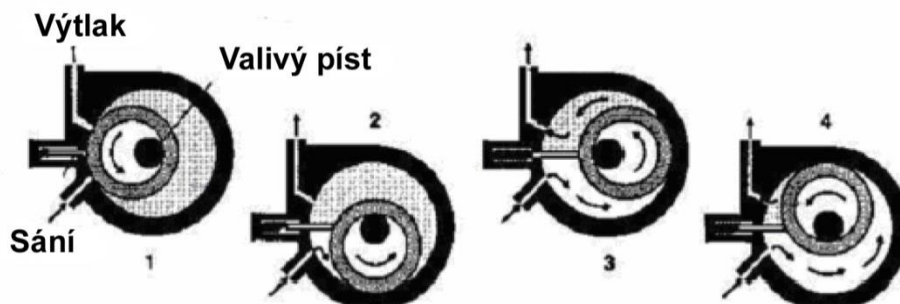
Obr. 3.3 Princip výparného procesu ve vzduchem ohřívaném výparníku (expanzní ventil, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ na začátku výparníku, kapalně chladivo $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, přehřátá pára chladiva. Konec výparníku $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ vypařování končí, přehřívání začíná)

3.2.3. Kompresor

Kompresor nasává plyn z výparníku udržovaný při žádaném tlaku a správné teplotě – výparné teplotě. U vypařování chladiva ve výparníku je hlídána rovnováha mezi teplem použitým pro vypařování kapaliny a sací kapacitou kompresoru. Plyn chladiva odchází z kompresoru při vysokém tlaku a teplotě.

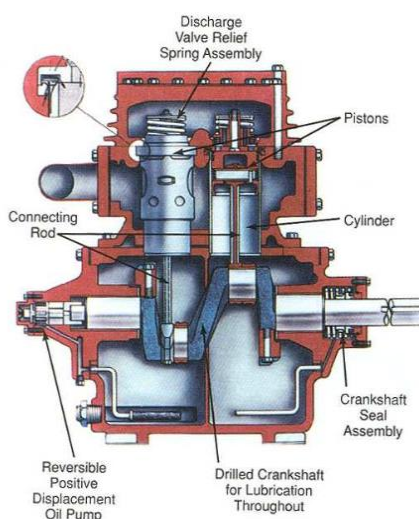
Pro tepelná čerpadla pro rodinné domy a průmyslové budovy jsou používány tři druhy kompresorů: pístové, s valivým pístem a scroll (rotační). Ve většině případů jde o hermetické kompresory, což znamená, že pohonný elektrický motor a kompresor jsou uloženy v jedné skříni (tlakové nádobě), která je zavařena a vzniká tak jeden blok. Tímto způsobem je zabráněno únikům chladiva do atmosféry přes spojovací těsnění.

- **Kompresory s valivým pístem** jsou často používány v tepelných čerpadlech vzduch – vzduch. Excentrický píst s radiálně se pohybující lamelou ve skříní kompresoru stlačí plyn, jak je ukázáno na Obr. 3.4. Tyto kompresory mají obecně vyšší účinnost než pístové kompresory stejné kapacity.



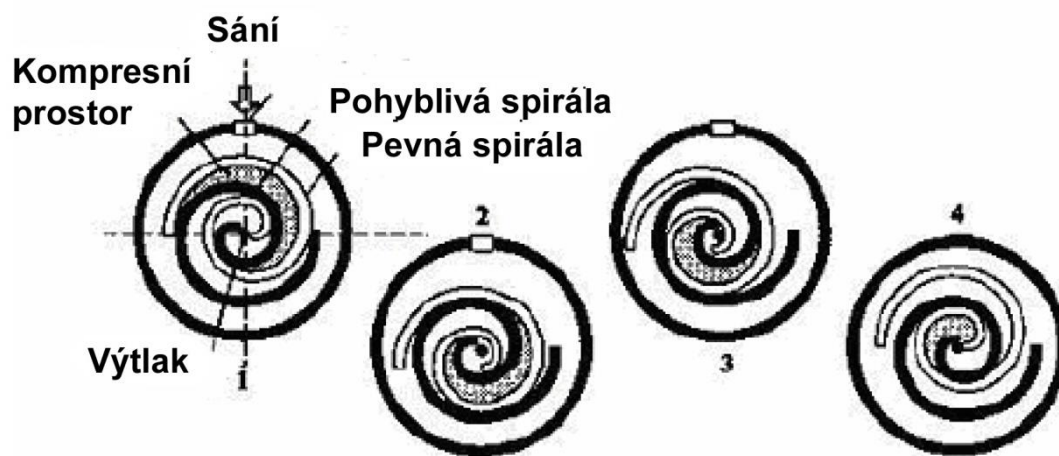
Obr. 3.4 Pracovní cyklus rotačního kompresoru s valivým pístem

- **Pístové kompresory** jsou nejstarší typy kompresorů. Reciproční píst nasává plyn přes sací ventil, stlačí ve válci a vytlačí přes ventil výtlačný. Sací i výtlačný ventil jsou zavřeny v průběhu komprese a výtlačný ventil se otevře, pokud tlak ve válci dosáhne potřebného výtlačného tlaku, jak je znázorněno na Obr. 3.5. Vývoj pístových kompresorů kontinuálně pokračuje a je předpoklad jejich dalšího používání v tepelných čerpadlech. V pístových kompresorech je vinutí elektromotoru obvykle chlazené nasávaným plynem chladiva.



Obr. 3.5 Pracovní cyklus pístového kompresoru

- **Scroll kompresory** jsou více používány, protože mají několik významných výhod vůči jiným předchozím typům kompresorů. To se týká zejména množství pohyblivých částí, z čehož vyplývá delší životnost a menší hlučnost bez vibrací. Další výhodou je malý nepříznivý vliv při nasátí kapek z výparníku do kompresoru. Na rozdíl od recipročních pístových kompresorů (jako i rotačních pístových kompresorů) je důležité získat správný smysl otáčení, což souvisí při použití třífázového proudu se správným vinutím fází. Při Scroll kompresorech je vinutí pohonného elektromotoru chlazené studeným nasávaným chladivem. Princip pracovní činnosti je znázorněn na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Pracovní cyklus scroll kompresoru (nasávání, výtlač, kompresní objem, pohyblivá spirála, pevná spirála)

- **Dvojité rotační kompresory**. Tyto kompresory vyvinula firma Toshiba, která již delší dobu věnuje značnou pozornost vývoji nejmodernějších kompresorových technologií. Výsledkem dlouhodobého vývoje je dvoustupňový rotační vačkový kompresor. Dvojitý rotační kompresor má dvě pevné komory. V každé komoře se plynule otáčí polohovaný píst (excentrická vačka). Obě vačky jsou uloženy na jedné hřídeli v protilehlých polohách tak, aby bylo zajištěno vyrovnané namáhání hřídele a ložisek rotoru.



Obr. 3.7 Řez dvojitým rotačním kompresorem

Výhodou této unikátní koncepce je menší mechanické namáhání konstrukčních prvků. Výsledkem je nižší potřeba mazání a větší odolnost při nízkých otáčkách než u běžných scroll kompresorů. Díky své konstrukci je kompresor přímo předurčen pro provoz s invertorem. V porovnání s běžnými kompresory je dvojitý rotační kompresor mnohem menší a kompaktnější, má nižší hmotnost a vyšší výkon. Dvojitý rotor zajišťuje nízké vibrace a tichý provoz. Účinnost je zlepšena v širokém rozsahu otáček. Vysokého výkonu se dosahuje při nízké spotřebě energie. Optimálním chladivem pro tento kompresor je R-410A. Využití R-410A přineslo ještě vyšší účinnost a podstatně se snížila spotřeba proti běžným scroll kompresorům.

3.2.4. Kondenzátor

Horký plyn z kompresoru je přiváděn do kondenzátoru, jehož funkcí je odebrat teplo z chladiva do chladícího média – většinou vody nebo vzduchu. Pro dosažení tohoto toku tepla, musí být kondenzační teplota vždy vyšší než teplota chladícího média. Množství tepla, které je potřebné odvést z kondenzátoru do chladícího média je dáno součtem tepla dodávaného do výparníku a mechanické (elektrické) energie dodávané kompresoru.

Chladivo vstupující do kondenzátoru ve formě horké páry je ochlazené na kondenzační teplotu (teplotu nasycených par). Výměna tepla při tomto procesu není příliš velká, protože ochlazené chladivo zůstává ve stavu páry.

Ve většině tepelných čerpadel jsou jako kondenzátory používány pájené nebo svařované deskové výměníky tepla.



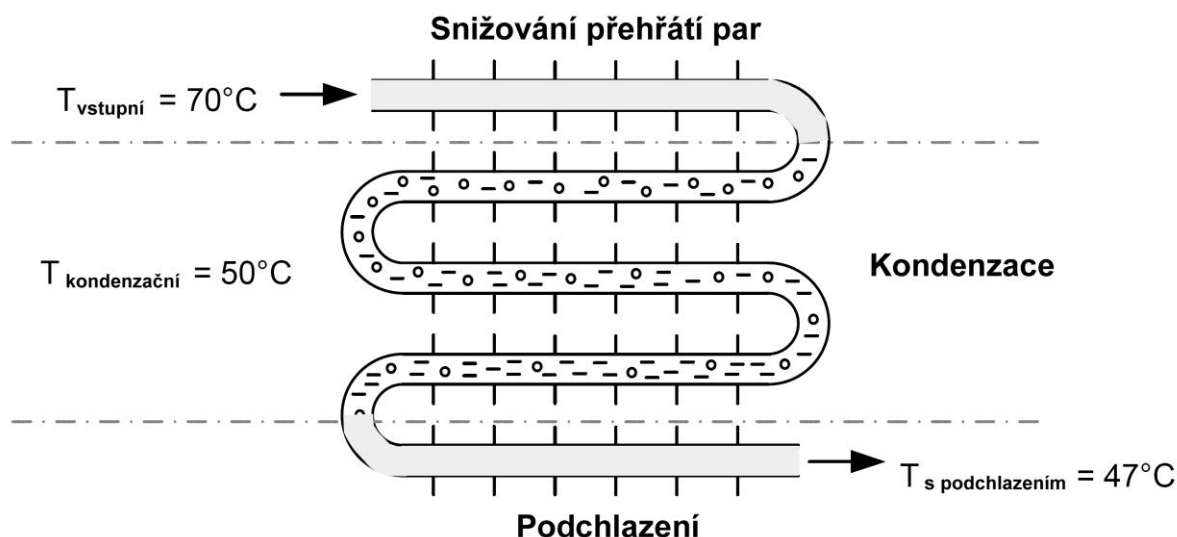
Obr. 3.8 Ukázka a složení deskového výměníku

V kondenzátoru probíhají tři různé procesy:

(Před)chlazení přehřátých par - Chladivo vstupující do kondenzátoru ve formě horké páry je ochlazené na kondenzační teplotu (teplotu nasycených par). Výměna tepla při tomto procesu není příliš velká, protože ochlazené chladivo zůstává ve stavu páry.

Kondenzace – Kondenzace začíná, když je chladivo ochlazené na kondenzační teplotu, která odpovídá kondenzačnímu tlaku. V průběhu kondenzace čistých látek a směsí „azeotropních chladiv“ zůstávají tlak i teplota konstantní. „Zeotropní“ směsi chladiv také kondenzují při konstantním tlaku, ale snižuje se jejich teplota, protože různé složky směsi kondenzují při různých teplotě jedna po druhé. V oblasti kondenzace je dosahována největší účinnost přenosu tepla.

Podchlazení - po zkondenzování celého množství chladiva začíná proces podchlazení, při kterém klesá teplota kapalného chladiva pod kondenzační teplotu (teplotu nasycení). Tento proces je důležitý pro zabránění vzniku parních bublinek před vstupem do expanzního ventilu, což by mohlo částečně zablokovat průtok chladiva. Tento proces může probíhat částečně již v kondenzátoru (viz. Obr. 3.9), ale hlavní rozsah podchlazení chladiva se dosahuje v dalším výměníku tepla (dochlazovač), který bývá většinou řešen jako tzv. vnitřní výměník tepla (podchlazení se dosahuje pomocí chladných par nasávaných do kompresoru). Na Obr. 3.9 jsou znázorněny popsané procesy v kondenzátoru (nejsou brány do úvahy tlakové ztráty třením při proudění chladiva).



Obr. 3.9 Procesy ve vzduchem chlazeném kondenzátoru

V některých tepelných čerpadlech je umístěn malý výměník tepla mezi kompresorem a kondenzátorem nazývaný předchlazovač. Výhodou je umožnění získání části tepelné energie produkované tepelným čerpadlem při vyšší teplotě než je teplota kondenzační (například pro přípravu horké vody) a současně je umožněno nastavit kondenzační teplotu jen těsně nad potřebnou teplotu vody pro velkoplošné nebo radiátorové vytápění. Pokud není v oběhu instalován uvedený předchlazovač plynu chladiva vystupujícího z kompresoru, je potřeba úměrně zvýšit kondenzační teplotu pro dosažení ochlazení par což snižuje energetickou efektivnost (výkonové číslo) systému tepelného čerpadla.

3.2.5. Expanzní ventil

Expanzní ventily pracují jako různé škrticí klapky, udržují tlakový rozdíl mezi vysoko a nízkotlakou stranou chladicího oběhu a regulují tok chladiva z kondenzátoru do výparníku. Při přechodu chladiva expanzním ventilem se při poklesu tlaku část chladiva okamžitě vypaří. Chladivo se na základě odebraného výparného tepla ochladí a vstupuje jako směs páry a kapaliny do výparníku při výparné teplotě. Nejjednodušším expanzním zařízením je škrcení pomocí kapilární trubice mezi kondenzátorem a výparníkem.

V tepelných čerpadlech, která pracují při různých teplotních podmínkách na vysokotlaké teplé i nízkotlaké studené straně se jako expanzní zařízení všeobecně používá termostatický expanzní ventil (dále jen „TEV“). Tyto ventily mají dobré regulační vlastnosti a relativně široké pracovní rozmezí. U termostatického expanzního ventilu je snímač s prchavou látkou

přípevněný přímo na potrubí vycházející z výparníku a provádí změnu teploty na změnu tlaku. Tlak ve snímači působí na mechanismus tak, že otevírá ventil, pokud teplota a tedy i tlak ve snímači stoupá. Pokud se tok chladiva přes výparník zvýší, teplota ve snímači opět poklesne (sníží se teplota vystupujícího chladiva z výparníku). Použitím nastavovací smyčky pružiny v expanzním ventilu můžeme udržovat přehřátí na požadované úrovni. Termostatické expanzní ventily zabezpečují udržování přehřátí na úrovni přibližně 4 až 8 °C.



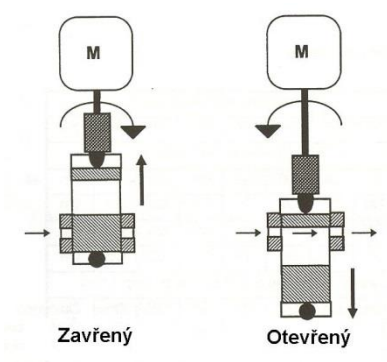
Obr. 3.10 Termostatický expanzní ventil TEV

Nelze opomenout důležitou část TEV, kterou je teplotní čidlo s názvem tykavka. Je to malá nádobka naplněná vhodným médiem, u kterého se při zvyšování teploty zvyšuje tlak. Pomocí kapiláry se tlak přenáší na membránu TEV. Tlak nad membránou se zvyšuje s rostoucí teplotou tykavky. Tlak pod membránou roste s vypařovací teplotou. Rozdíl těchto tlaků odpovídá přehřátí chladiva a vytváří sílu, která působí proti síle pružiny ventilu a otevírá či zavírá trysku ventilu. Když vzroste ve výparníku přehřátí chladiva, ventil se otevře a naopak.

Na trysku TEV tedy působí tři síly. První síla vyvolaná tlakem na membránu od tykavky, která je funkcí teploty, působící shora, trysku otevírá. Druhá síla od vyrovnávání tlaku z potrubí, trysku zavírá. A třetí síla od pružiny ventilu, která ventil také zavírá. Tato síla od pružiny je během provozu konstantní. Dá se měnit otáčením regulačního šroubu na ventilu. Velikost trysek TEV se volí podle druhu chladiva a požadovaného výkonu. Rovněž náplň tykavky se pro různá chladiva liší.

Podobně pracuje i elektronický expanzní ventil (dále jen „EEV“), který však reguluje průtok chladiva výparníkem značně přesněji. Při delším provozu tepelného čerpadla lze při jeho použití vyčíslit úspory energie. Úspora však není úplně zadarmo. Elektrický příkon jeho ovládání a servomotoru může činit až 20 W. K ventilu patří ještě provozní regulátor, řídicí panel a čidla. Po konstrukční stránce je ventil spíše kombinací šoupátka se stoupajícím

vřetenem, které je poháněno malým servomotorem. Geometrie otevíraného průtočného průřezu v závislosti na zdvihu ventilu je taková, že průběh průtoku v závislosti na počtu impulzů od řídicího panelu (neboli také na zdvihu ventilu z polohy plného uzavření) je lineární. Celkový zdvih od plného uzavření do plného otevření vyžaduje 1600 impulzů. Krokový servomotor pro ovládání vřetene je dvoupólový s dvoufázovým permanentním magnetem. Pracuje při konstantním stejnosměrném proudu v každé fázi. Napětí bývá 24 V. Krokovací frekvence okolo 330 Hz (plný zdvih z uzavření je dosažen cca za 5 sekund) je vhodná pro chladicí výkony od 20 do 30 kW, která se stoupajícím výkonem také stoupá.



Obr. 3.11 Ukázka principu termostatického expanzního ventilu

3.2.6. Výpočet základních provozních parametrů tepelného čerpadla

U tepelného čerpadla se neudává jeho účinnost, ale tzv. topný faktor, který lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$\varepsilon = \frac{Q_u}{P_e} \quad (3.1)$$

Tento vztah udává kolikrát je větší získaný výkon (získaná energie) Q_u proti vynaloženému příkonu (vynaložené energii) P_e . Topný faktor závisí na teplotě zdroje tepla a na teplotě, při které je teplo vyprodukováno (a spotřebovááno). Čím vyšší je teplota zdroje tepla a čím nižší je teplota, při které se teplo spotřebovává, tím větší je topný faktor.

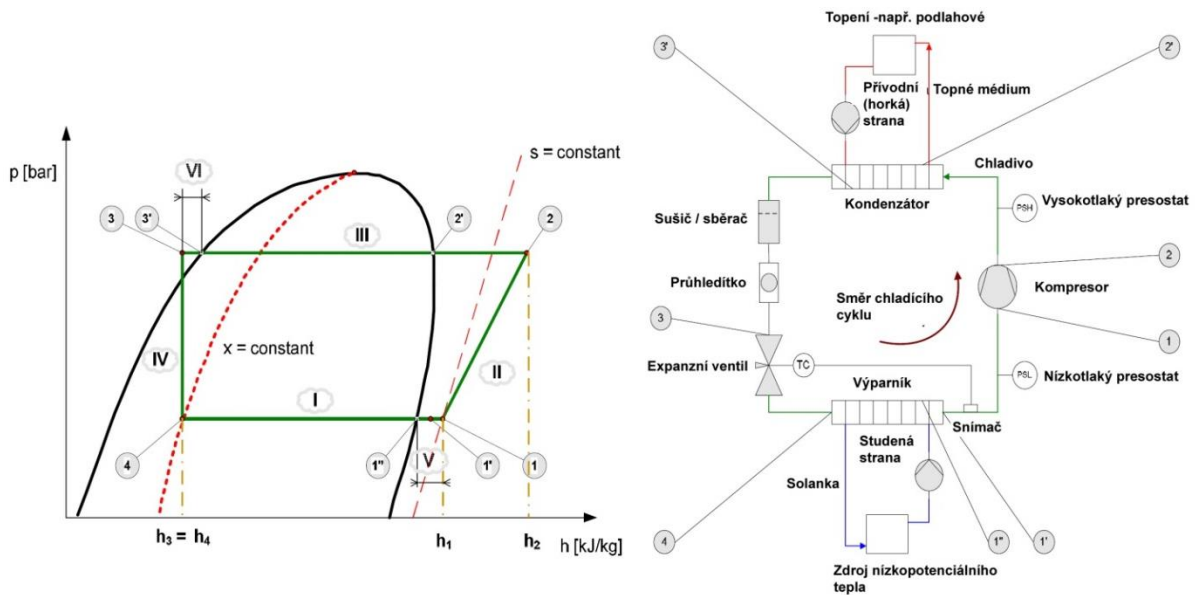
Průměrný topný faktor, vyjadřující poměr průměrných hodnot tepelných výkonů Q_{TT} a energetických příkonů Q_{EE} je dán:

$$\varepsilon = \frac{Q_{TT}}{Q_{EE}} \quad (3.2)$$

Topný faktor celého systému tepelného čerpadla, který zahrnuje i příkony strojů nezbytných pro cirkulaci zdroje nízkopotenciálního tepla a ohřivané látky systémem:

$$\varepsilon_{TC} = \frac{Q_{T,TC}}{Q_{E,TC}} \tag{3.3}$$

Konkrétní termodynamický oběh může být zobrazen v p-h diagramu daného chladiva. Hlavní body zájmu jsou naznačeny v následujícím diagramu:



Obr. 3.12 Termodynamický oběh pro chladivo R 407 C (1 – vstup do kompresoru, 1' - výstup z výparníku, 1' - začátek přehřívání, 2 – výstup z kompresoru, 2' - začátek kondenzace, 3 – vstup do expanzního ventilu, 3' - začátek podchlazování, 4 – vstup do výparníku)

Ze známého průtoku chladiva m můžeme snadno dopočítat základní vstupní a výstupní parametry:

Teoretická tepelná kapacita

$$Q_C = m.(h_2 - h_3) \text{ [kJ]} \tag{3.4}$$

Teoretická chladicí kapacita

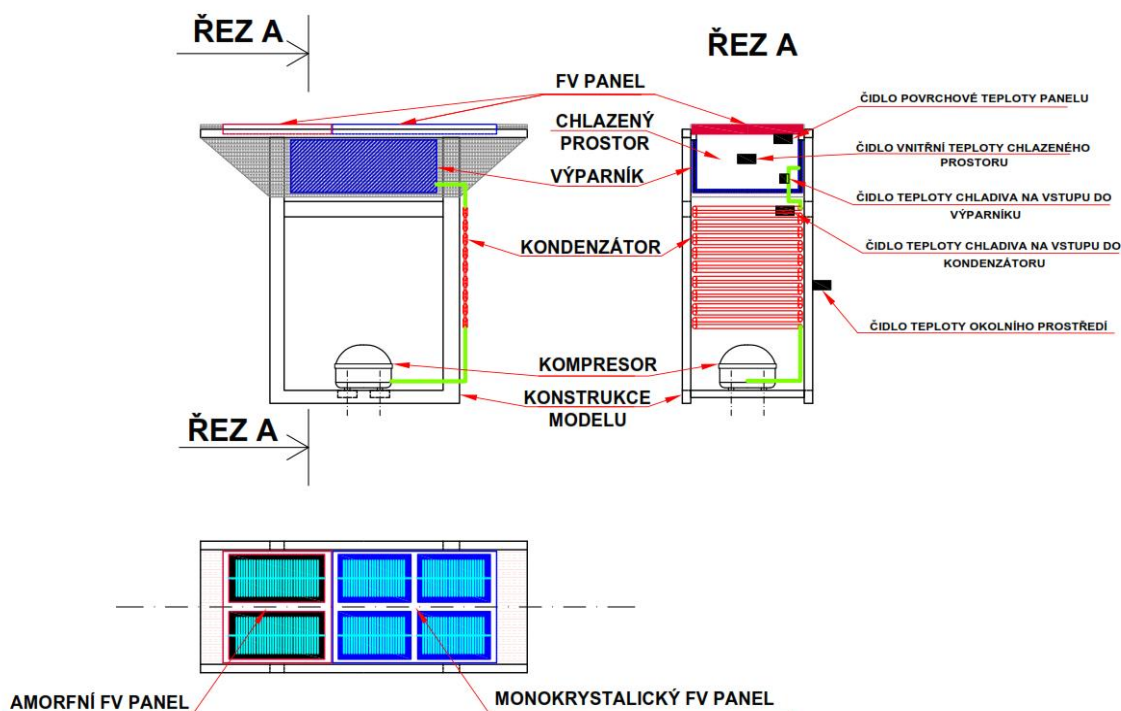
$$Q_O = m.(h_1 - h_4) \text{ [kJ]} \tag{3.5}$$

Teoretický příkon kompresoru

$$P = m.(h_2 - h_1) \text{ [kJ]} \tag{3.6}$$

4. Popis konstrukce experimentálního modelu

V této části práce se spojí výše popsané principy do jednoho modelu, který posloužil pro měření teplotních charakteristik FV panelů. Základem měřicího modelu je chladivový okruh mrazicího boxu osazený do ocelové nosné konstrukce.



Obr. 4.1 Konstrukční schéma měřicího modelu

Výparník je umístěn v chladicím prostoru v horní části modelu. Do prostoru výparníku jsou vsazeny dva FV panely. Celý chlazený prostor je izolován polyuretanovou pěnou a polystyrenovými deskami pro co nejnižší ztrátu tepla při provozu.



Obr. 4.2 Umístění FV panelů v chladicím prostoru

Pro měření byl použit monokrystalický a amorfní FV panel s následujícími parametry:

	Monokrystalický panel	Amorfní panel
Výrobce	Rich Solar	Schott Solar
Typ	RS M10	ASI-F 2/12
Maximální Výkon [Wp]	10	2,1
Napětí naprázdno [V]	21,96	22,8
Proud nakrátko [A]	0,63	0,165
Maximální provozní napětí [V]	17,82	16,8
Maximální provozní proud [A]	0,57	0,125
Váha [kg]	1,5	0,6
Rozměry (v/š/h) [mm]	360/290/25	293/144/21

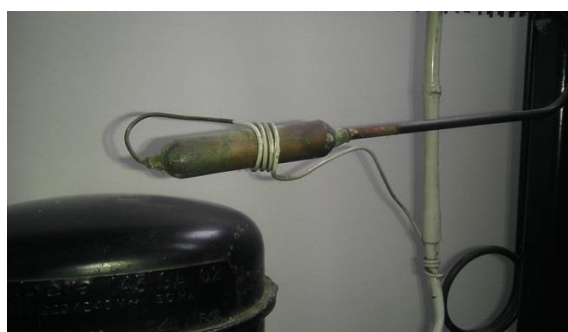
Tabulka 4.1 Parametry monokrystalického a amorfního FV panelu

Na čelní straně je umístěn kondenzátor v podobě potrubí opatřeném lamelami.



Obr. 4.3 Umístění výparníku

Za kondenzátorem je umístěn jednoduchý expanzní ventil v podobě kapilární trubice.



Obr. 4.4 Kapilární trubice (nejjednodušší expanzní ventil)

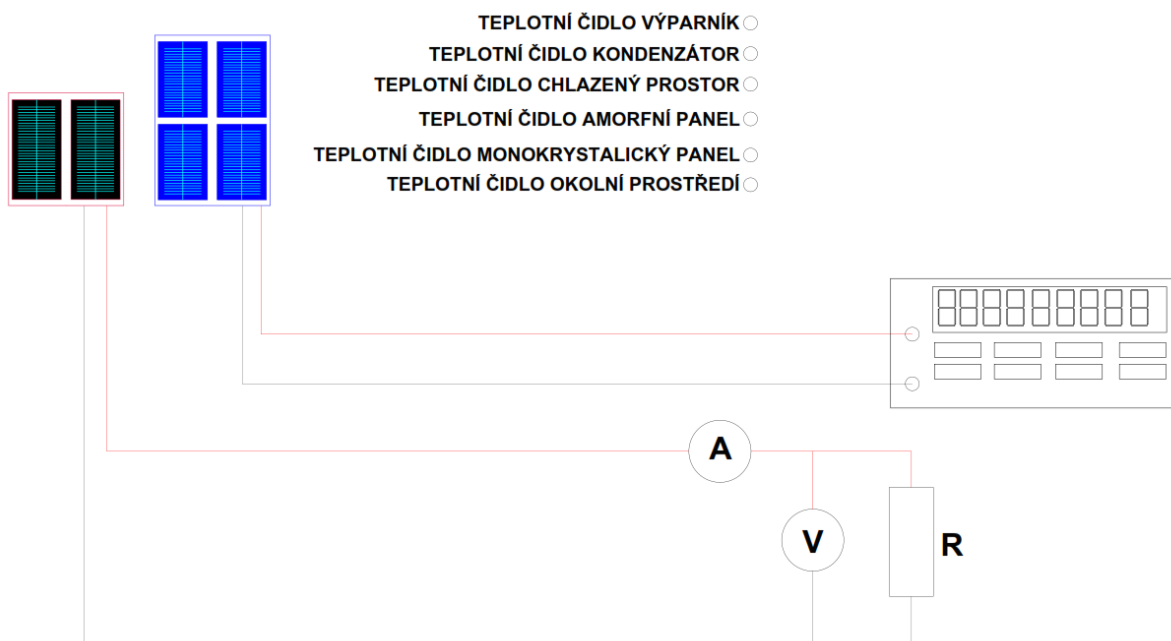
Posledním komponentem je kompresor umístěný ve spodní části modelu. Kompresor má klasické napájení ze sítě a jeho spínání je řízeno termostatem umístěným v chlazeném prostoru solárních panelů.

Pro přesné odečítání teplotních charakteristik je model osazen teplotními čidly PT 100.

Jako zdroj světla jsem vzhledem k podobnosti se slunečním spektrem použil halogenidovou výbojku o příkonu 1000 W. Výbojka byla umístěna 60 cm nad vodorovnou plochou solárních panelů tak, aby veškeré vyzářené světlo dopadlo na oba FV panely. Světelná účinnost výbojky je udávána výrobcem na 13 %.

5. Postup měření na experimentálním modelu

Celou měřicí úlohu jsem zapojil podle následujícího schématu:



Obr. 5.1 Zapojení měřicí úlohy

Jako zátěž jsem použil proměnný odpor nastavovaný pro jednotlivá měření na hodnotu 200 Ω, 1000 Ω, 1500 Ω, 2100 Ω. Napětí a proud z monokrystallického FV panelu a všechny hodnoty odporů teplotních čidel byly odečítány přístrojem Keithly 2700 Multimetr a logovány do .xsl souboru.



Obr. 5.2 Měřicí přístroj Keithly 2700

Po připojení modelu na napájecí zdroj bylo potřeba nejprve snížit teplotu v chladicím prostoru a tím i teplotu FV panelů. Při dosažení prostorové teploty cca -4 °C a teploty panelů cca 12 °C byla spuštěna halogenidová lampa.

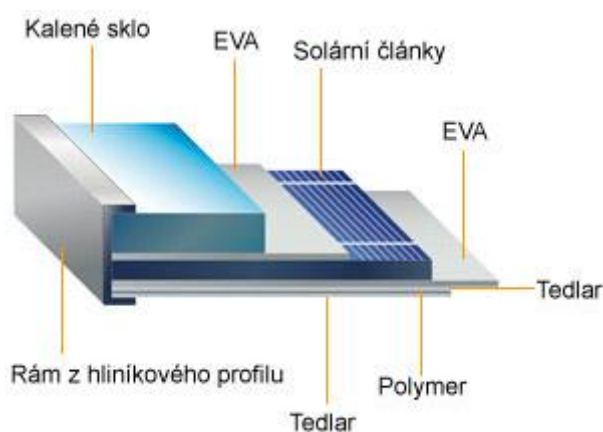
Při ohřevu FV panelů byly odečítány hodnoty odporů teplotních čidel, proudů a napětí obou panelů po třech sekundách a zaznamenávány do výstupního souboru. Po dosažení teploty panelů cca 70 °C bylo měření ukončeno.

Pro získání přesných teplot bylo zapotřebí přepočítat odpory R termočlánků podle následující závislosti:

$$T=R \cdot 0,39 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.1)$$

Vzhledem k teplotní oblasti, ve které měření probíhalo, je možné uvažovat lineární závislost teploty na odporu termočlánku.

Teplota FV panelů byla měřena na jejich spodní části (viz. Obr. 4.1), proto je nutné počítat s tím, že samotné tělo panelu mělo teplotu o něco větší, než bylo naměřeno. Na následujícím obrázku uvádím řez FV panelem pro představu složení jeho jednotlivých vrstev:



Obr. 5.3 Řez FV panelem

Teplotním čidlem je tedy měřeno teplo, které prošlo všemi vrstvami FV panelu. Abychom získali teplo, které pojme solární článek a skutečnou teplotu solárního článku, je potřeba použít rovnici pro ustálený stav:

$$Q = \lambda \cdot S \frac{t_2 - t_1}{d} \tau \quad (5.2)$$

kde Q ... množství tepla

λ ... součinitel tepelné vodivosti

S ... kolmý průřez (v našem případě plocha panelu)

t_1, t_2 ... teplotní rozdíl

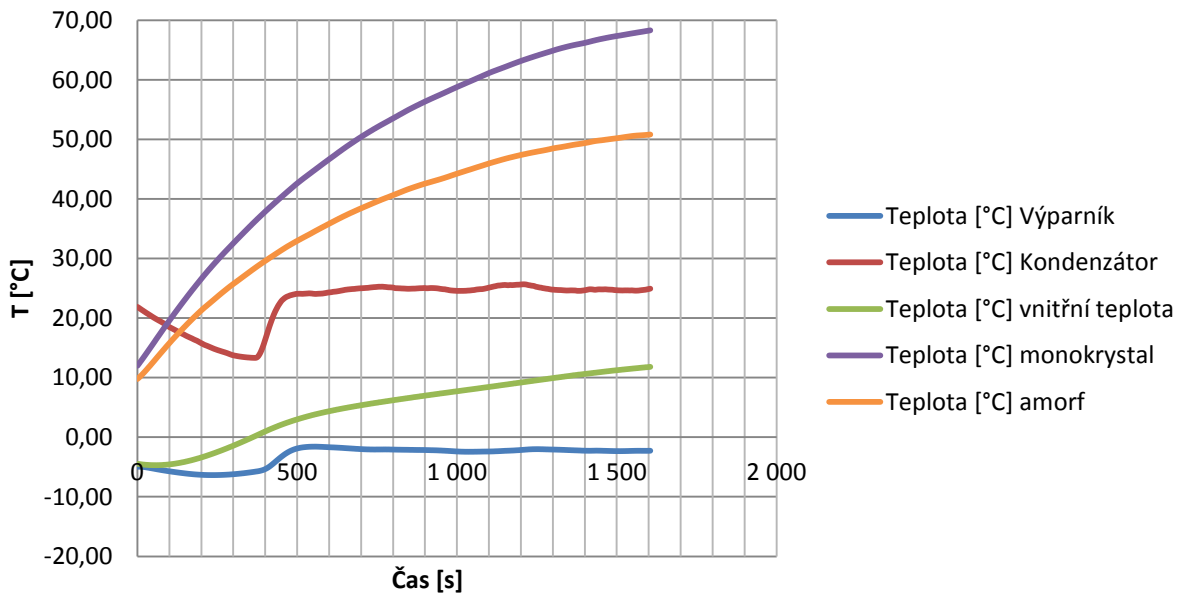
d ... tloušťka materiálu (tloušťka solárního panelu)

τ ... čas

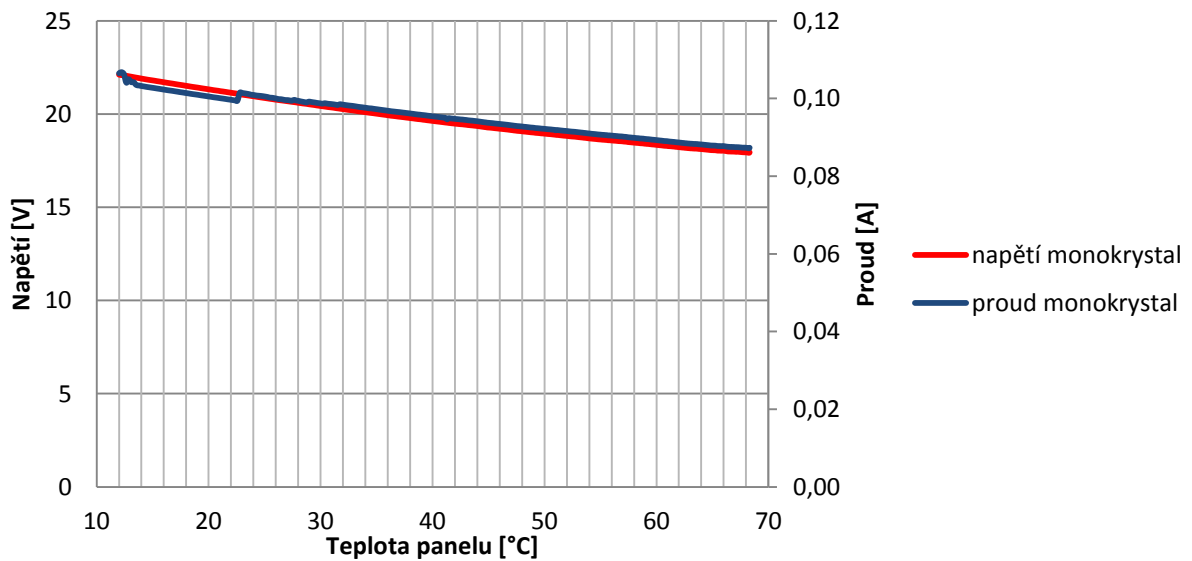
6. Výsledky experimentu

Podle výše zmíněného postupu měření jsem jako zátěž použil čtyři hodnoty stejnosměrného odporu, tedy 200 Ω, 1000 Ω, 1500 Ω, 2100 Ω. Následující grafy shrnují naměřená data teplot, napětí, proudů a výkonů podle daného zatížení.

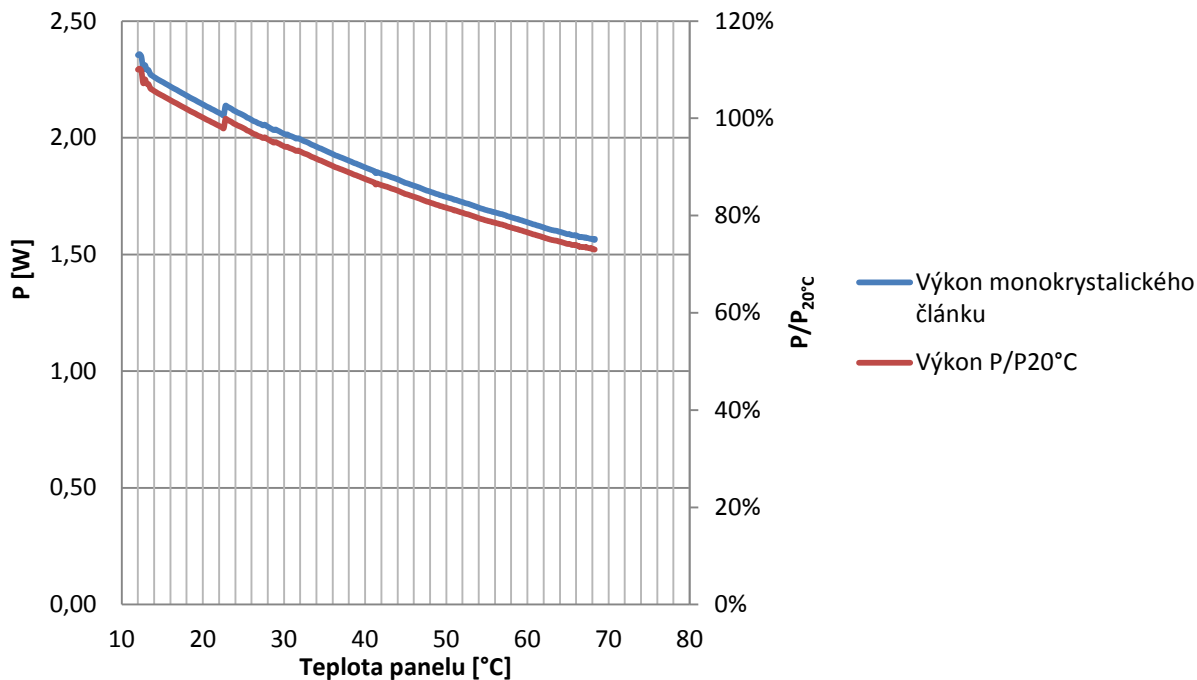
6.1. Zatěžovací odpor R 200 Ω



Obr. 6.1 Odečtené teplotní parametry jednotlivých částí modelu při měření se zatěžovacím odporem 200 Ω

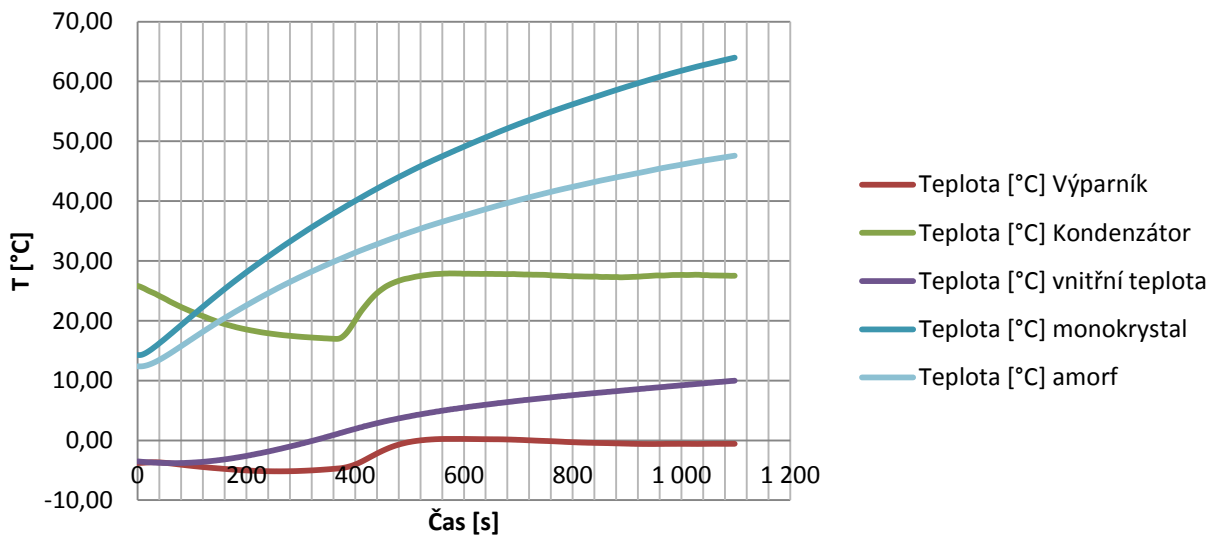


Obr. 6.2 Napěťové a proudové poměry monokrystalického panelu v závislosti na teplotě při měření se zatěžovacím odporem 200 Ω

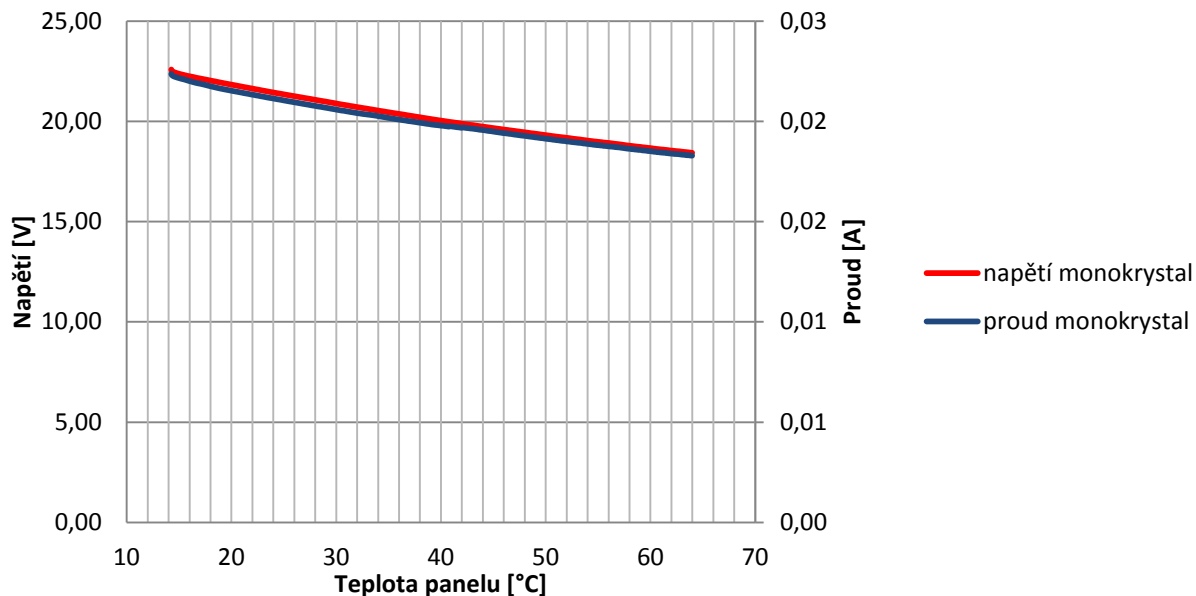


Obr. 6.3 Naměřený výkon a dopočítaný poměrný výkon vztažený k teplotě panelu 20 °C při měření se zatěžovacím odporem 200 Ω

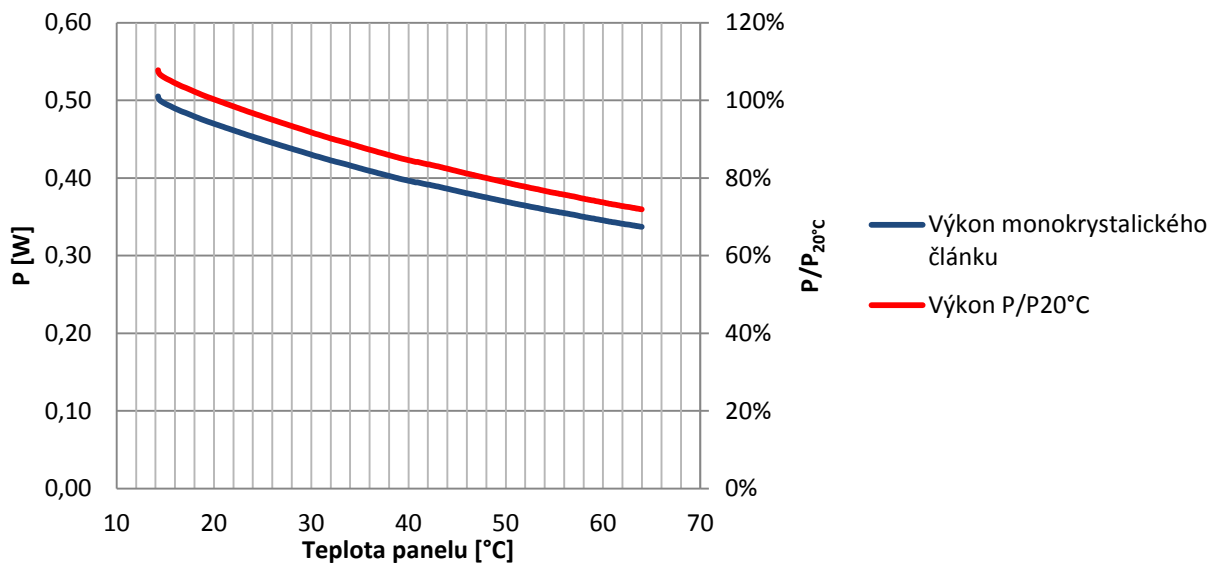
6.2. Zatěžovací odpor R 1000 Ω



Obr. 6.4 Odečtené teplotní parametry jednotlivých částí modelu při měření se zatěžovacím odporem 1000 Ω

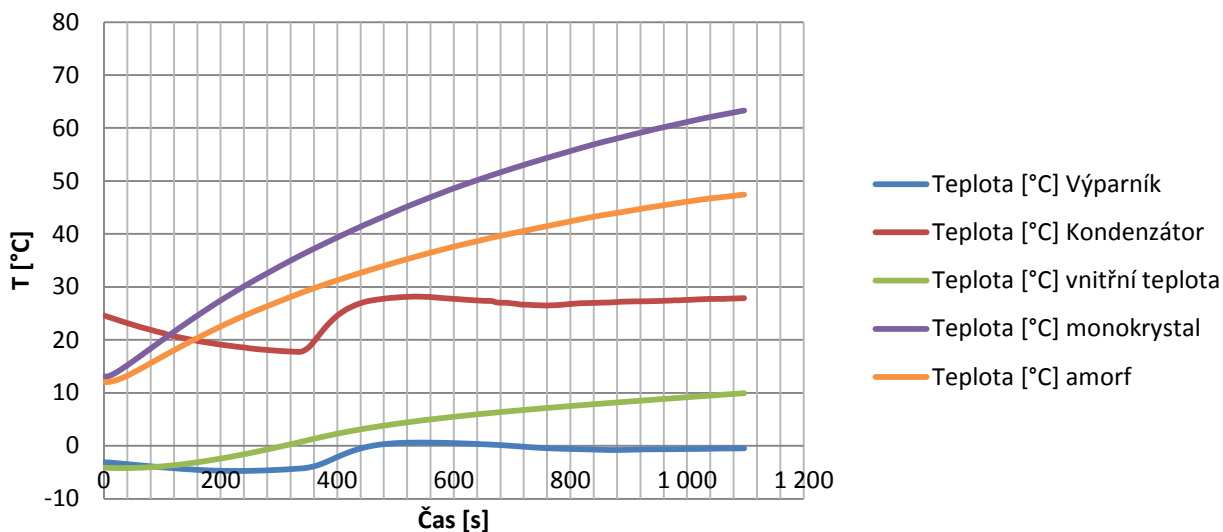


Obr. 6.5 Napěťové a proudové poměry monokrystalického panelu v závislosti na teplotě při měření se zatěžovacím odporem 1000 Ω

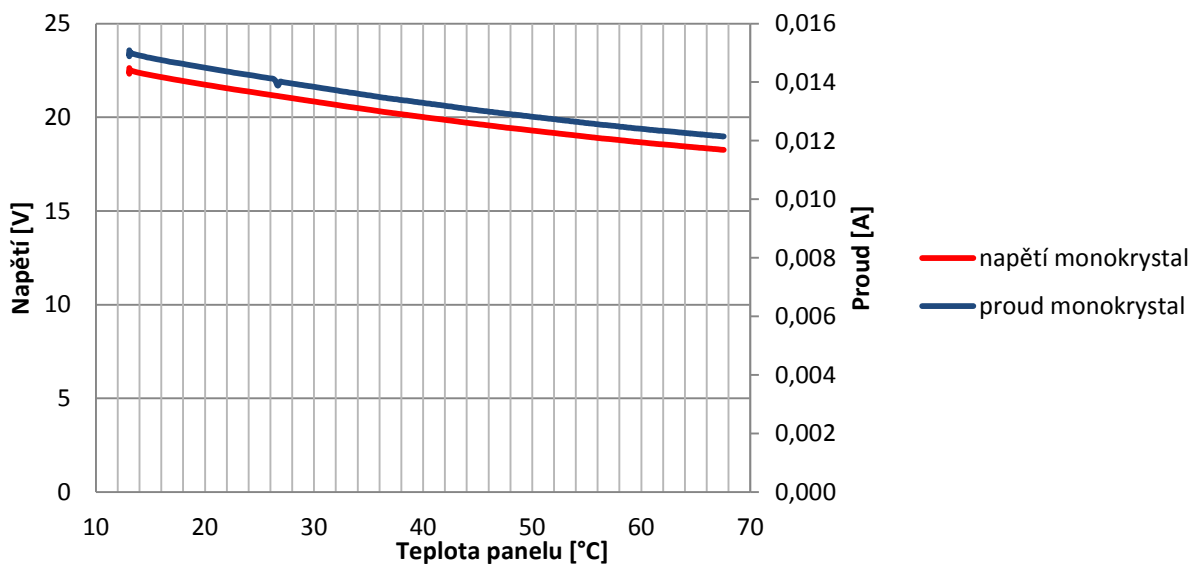


Obr. 6.6 Naměřený výkon a dopočítaný poměrný výkon vztahovaný k teplotě panelu 20 °C při měření se zatěžovacím odporem 1000 Ω

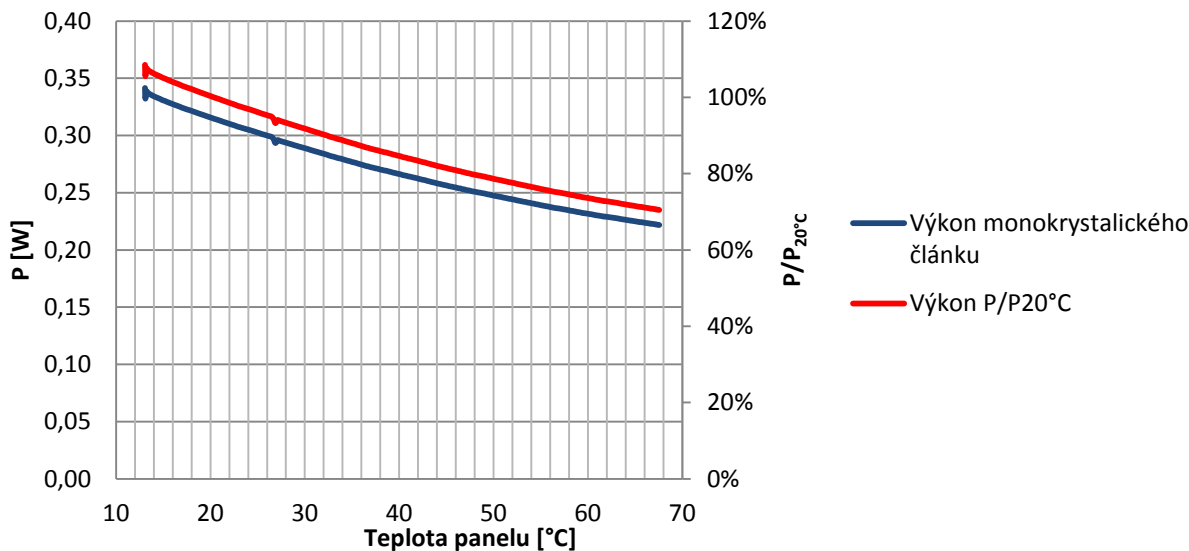
6.3. Zatěžovací odpor R 1500 Ω



Obr. 6.7 Odečtené teplotní parametry jednotlivých částí modelu při měření se zatěžovacím odporem 1500 Ω

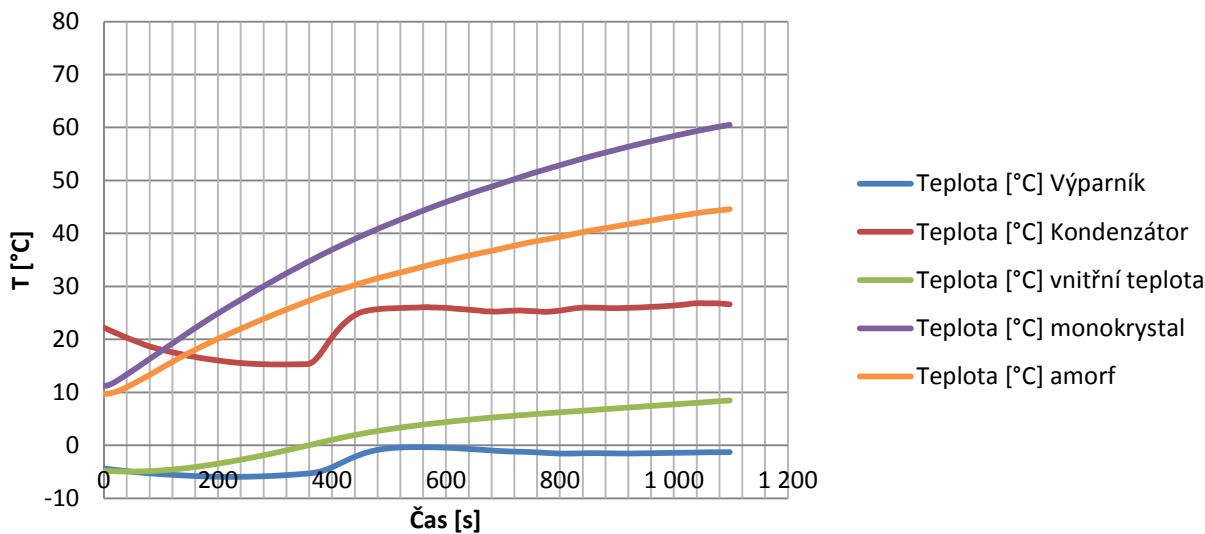


Obr. 6.8 Napěťové a proudové poměry monokrystalického panelu v závislosti na teplotě při měření se zatěžovacím odporem 1000 Ω

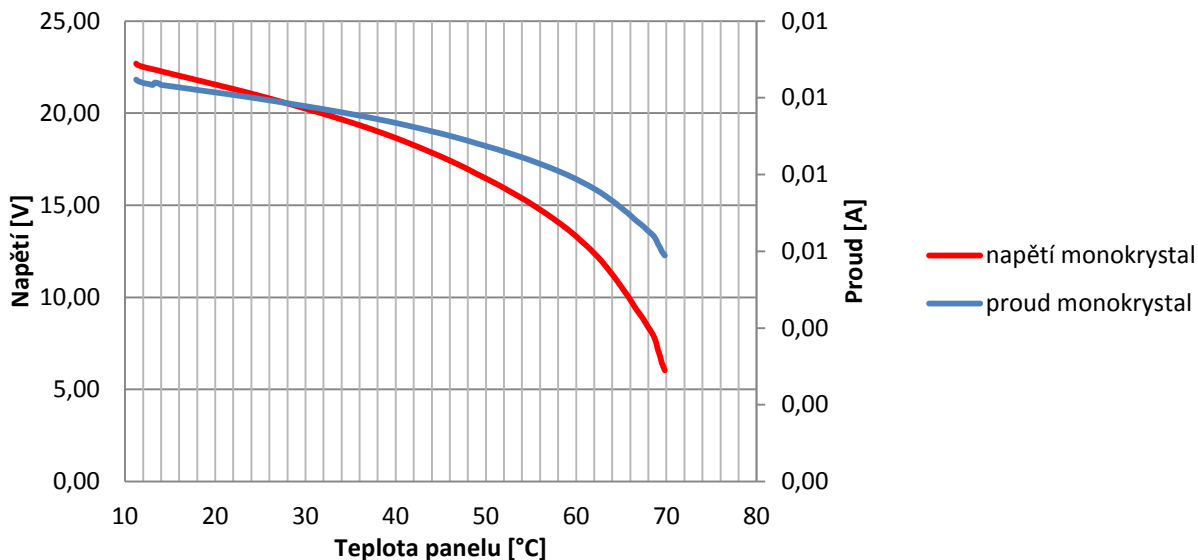


Obr. 6.9 Naměřený výkon a dopočítaný poměrný výkon vztažený k teplotě panelu 20 °C při měření se zatěžovacím odporem 1500 Ω

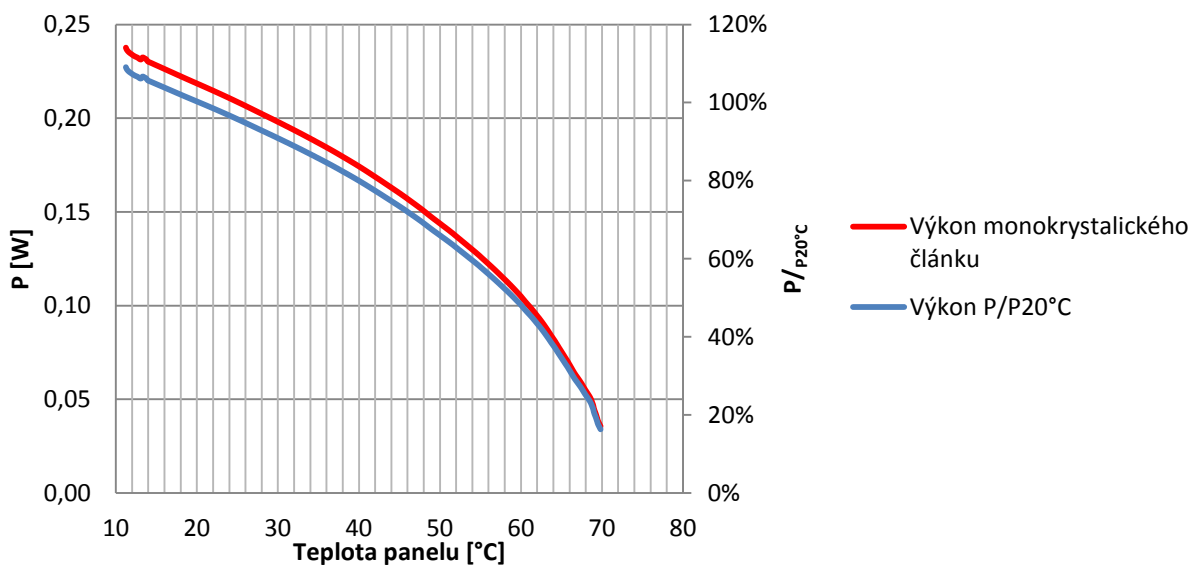
6.4. Zatěžovací odpor R 2100 Ω



Obr. 6.10 Odečtené teplotní parametry jednotlivých částí modelu při měření se zatěžovacím odporem 2100 Ω



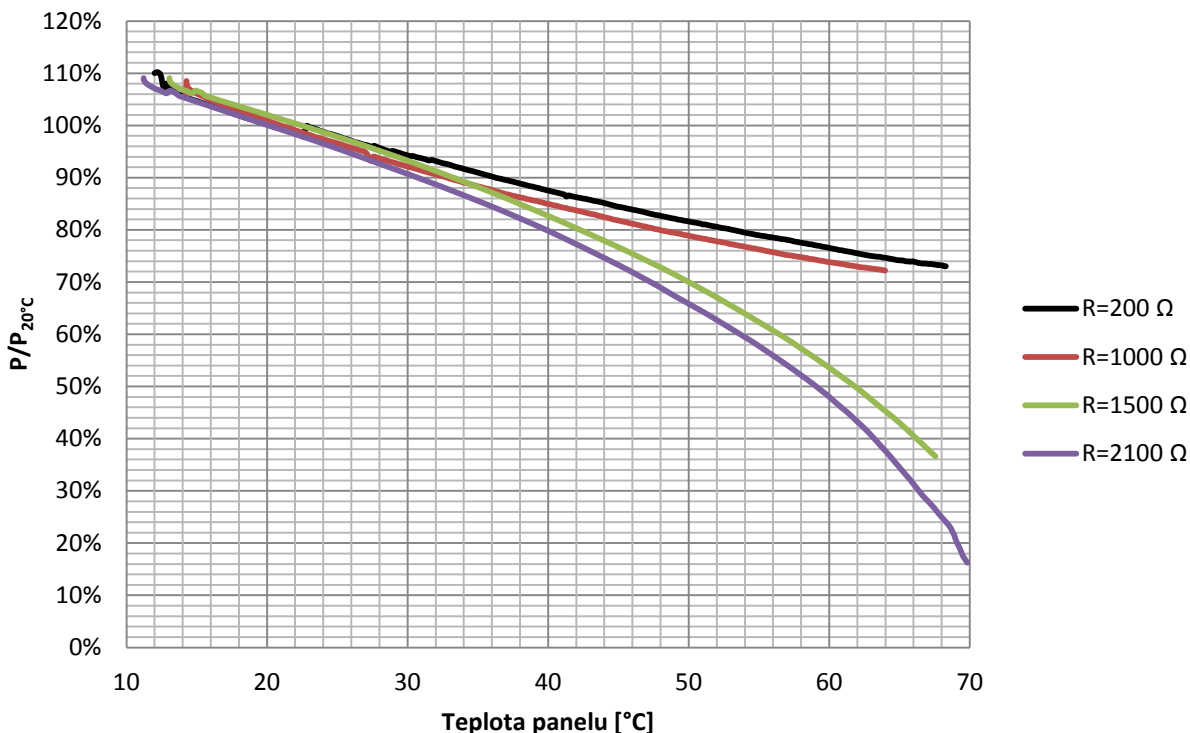
Obr. 6.11 Napěťové a proudové poměry monokrystalického panelu v závislosti na teplotě při měření se zatěžovacím odporem 2100 Ω



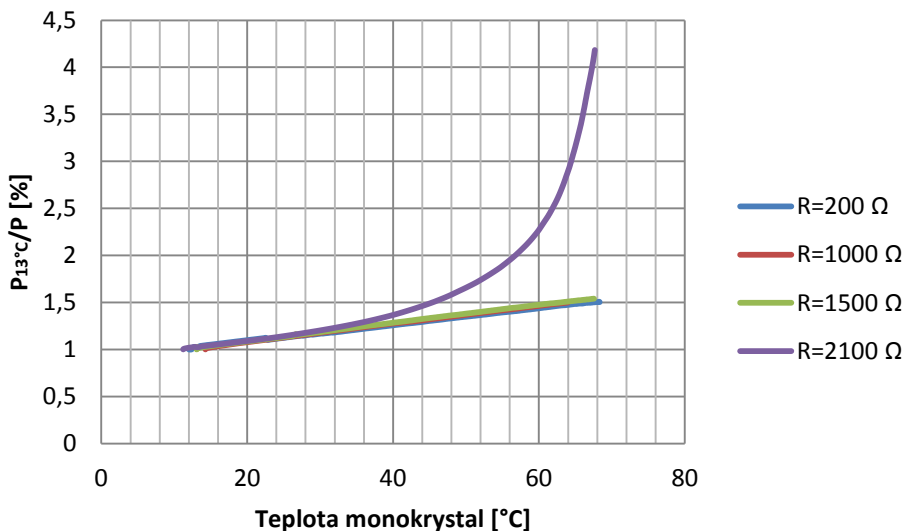
Obr. 6.12 Naměřený výkon a dopočítaný poměrný výkon vztažený k teplotě panelu 20 °C při měření se zatěžovacím odporem 2100 Ω

6.5. Vyhodnocení naměřených dat

V následující části je uvedeno porovnání výkonových parametrů jednotlivých měření. Pro monokrystalický panel je teplotní závislost poměrného výkonu zobrazena na následujícím grafu:

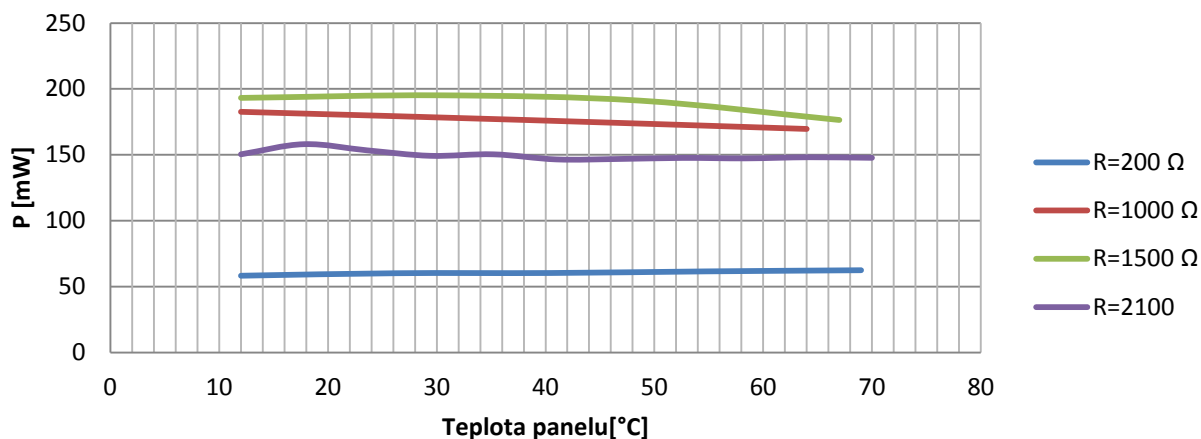


Obr. 6.13 Teplotní závislost poměrného výkonu monokrystalického FV panelu pro jednotlivá zatížení



Obr. 6.14 Výkon monokrystalického panelu při různém zatížení vztažený k teplotě panelu 13 °C

Vzhledem k velice malé teplotní závislosti výkonu amorfního článku není potřeba uvádět poměrný výkon a následující graf shrnuje naměřené hodnoty výkonů při jednotlivých hodnotách zatěžovacího odporu:



Obr. 6.15 Teplotní závislost výkonu amorfního FV panelu pro jednotlivá zatížení

Z porovnání průběhů teplotních závislostí monokrystalického FV panelu (viz. Obr. 6.14) je zřejmý poměrně značný nárůst účinnosti s klesající teplotou. V oblasti 12-28 °C je strmost průběhů cca 1 % poměrné účinnosti/1 °C. V tomto rozmezí je strmost všech průběhů stejná. Od teploty 28 °C výše se strmosti průběhů začínají lišit vzhledem k rozdílnému zatížení. V další části této práce budu tedy uvažovat s výše uvedenou strmostí. U amorfního fotovoltaického panelu se měřením potvrdila malá až nulová teplotní závislost elektrické účinnosti.

7. Tepelný model fotovoltaického panelu

Teplota fotovoltaického panelu je funkcí fyzikálních veličin materiálu FV článku, konfigurace FV článků do modulu, povětrnostních podmínek a okolního prostředí. Řada autorů popsala model jako součet energetických vstupů a výstupů přes tepelnou radiaci, vedení a proudění tepla a vyrobenou elektrickou energii. V této části se budu věnovat popisu lineární závislosti mezi dopadající energií slunečního záření a teplotou panelu v ustáleném stavu.

Model teploty panelu v ustáleném stavu nemůže být ověřen v časovém intervalu, kdy dochází k rychlým změnám intenzity slunečního záření. V těchto intervalech je potřeba počítat s velkým významem měrné tepelné kapacity C_{FV} fotovoltaického panelu.

Pro přestup tepla z FV panelu jsou nejvýznamnějšími činiteli proudění a radiace z přední a zadní části panelu. Vedení tepla z panelu do nosné konstrukce je v tomto případě zanedbáno, vzhledem k velice malé ploše styčných bodů. Pak výsledná změna teploty T v čase t může být vyjádřena jako:

$$C_{panel} \frac{dT_{panel}}{dt} = q_{dv} + q_{kv} + q_{prouděro} - P_{výstup} \quad (7.1)$$

Pro vyřešení rovnice 7.1 je nutné vyjádřit jednotlivé činitele, a to krátkovlnnou a dlouhovlnnou výměnu tepla sáláním, prouděním a vyrobený elektrický výkon.

7.1. Tepelná kapacita panelu

Pro výpočet povrchové teploty FV panelu je uvažováno se třemi vrstvami materiálu: vrstva FV článků na polyesterovém/teďlarovém trilaminátu a čelní skleněný povrch. Teplota je uvažována stejnoměrná napříč všemi vrstvami FV panelu. Rámeček panelu minimální plochu a proto je ve výpočtu zanedbán. Pak celková tepelná kapacita panelu je dána sumou tepelných kapacit jednotlivých vrstev jako:

$$C_{panel} = \sum_m A d_m \rho_m C_m \quad (7.2)$$

kde A ... plocha panelu [m^2]

d_m ... síla vrstvy v panelu [m]

ρ_m ... hustota materiálu [kg/m^3]

C_m ... měrná tepelná kapacita daného materiálu [$J/kg.K$]

Tabulka 7.1 sumarizuje hodnoty hustoty, měrné tepelné kapacity a síly každé vrstvy FV panelu. Plocha panelu je uvažována 0,51 m² (pro všechny vrstvy).

Vrstva panelu	ρ_m [kg/m ³]	C_m [J/kg.K]	d_m [m]	$A \cdot d_m \cdot \rho_m \cdot C_m$ [J/K]
Monokrystalický křemíkový FV článek	2330	677	0,0003	241
Polyester/Tedlar trilaminát	1200	1250	0,0005	382
Čelní sklo	3000	500	0,003	2295

Celkem

2918

Tabulka 7.1 Tepelná kapacita panelu (data z BP Solar - BP 582)

7.2. Přestup tepla krátkovlnným zářením

Záření, které dosáhne čelního povrchu panelu je funkcí intenzity přímého a rozptýleného krátkovlnného záření a pohltivosti FV článku. Celková vstupní hodnota krátkovlnného záření může být vyjádřena jako:

$$q_{kv} = \alpha \cdot \Phi \cdot A \quad (7.3)$$

kde α ... pohltivost povrchu článku

Φ ... celková dopadající energie na plochu panelu [W/m²]

Pohltivost je funkcí orientace a konfigurace článků v panelu, absorpčními a odrazovými vlastnostmi uzavíracího skla a absorpčními parametry FV článku. Pro křemík je cca 77% dopadajících fotonů ve správném energetickém pásmu pro absorpci FV článkem [2]. Při využití antireflekčního povrchu je možné snížit ztrátu energie odrazem na cca 10 % (údaj BP solar). Pak 10 % ztráta odrazem zbývajících fotonů dává pohltivost rovnu 0,7. Konstantní pohltivost je zjednodušením pro výpočet během periody prostředku dne. V praxi je pohltivost závislá na pozici slunce, s 20-30 % snížením při menších hodnotách dopadajícího záření (např. při svítání nebo soumraku)[35].

7.3. Přestup tepla dlouhovlnným zářením

Úroveň dlouhovlnného elektromagnetického záření na jednotku plochy je dána Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$q_{dv} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (7.4)$$

Kde σ ... Stefan – Boltzmannova konstanta $5,669 \times 10^{-8}$ [W/m².K⁴]

ε ... emisivita povrchu

Zlomek záření, které opustí jeden povrch a vstupuje do druhého, se označuje jako tzv. view faktor F [34]. Celková výměna dlouhovlnného záření mezi povrchy x a y je dána:

$$q_{dv,xy} = A_x \cdot F_{xy} \cdot (L_x - L_y) = A_y \cdot F_{yx} \cdot (L_y - L_x) \quad (7.5)$$

Kde F ... view faktor

L ... dlouhovlnné záření emitované z povrchu na jednotku plochy [W/m²]

Pro zjednodušení je zadní část panelu uvažována o teplotě blízké materiálu budovy, ke které je směřována a celková dlouhovlnná výměna mezi těmito povrchy je zanedbatelná. Pak je pouze zapotřebí spočítat dlouhovlnnou výměnu z předního povrchu FV panelu.

Naklonění povrch pod úhlem β_{povrch} od vodorovné roviny má view faktor $F = (1 + \cos(\beta_{\text{povrch}}))/2$ pro oblohu a $F = (1 - \cos(\beta_{\text{povrch}}))/2$ pro horizontální povrch země [36]. Vložení koeficientů pro oblohu, povrch země a FV panelu a s použitím předchozích dvou rovnic získáme celkovou energetickou výměnu na povrchu panelu:

$$q_{dv} = A \cdot \sigma \cdot \left(\frac{(1 + \cos \beta_{\text{povrch}})}{2} \cdot \varepsilon_{\text{obloha}} \cdot T_{\text{obloha}}^4 + \frac{(1 - \cos \beta_{\text{povrch}})}{2} \cdot \varepsilon_{\text{země}} \cdot T_{\text{země}}^4 - \varepsilon_{\text{panel}} \cdot T_{\text{panel}}^4 \right) \quad (7.6)$$

Podle [35] jsou parametry následující: $\varepsilon_{\text{obloha}}$ je rovno 0,95 pro jasnou oblohu a 1 pro zataženou oblohu; $\varepsilon_{\text{země}} = 0,95$; $\varepsilon_{\text{panel}} = 0,9$; $T_{\text{obloha}} = (T_{\text{okolní}} - \delta T)$ pro jasnou oblohu kde $\delta T = 20$ K, $T_{\text{obloha}} = T_{\text{okolní}}$ pro zataženou oblohu.

7.4. Přestup tepla prouděním

Newtonův ochlazovací zákon vyjadřuje konvektivní výměnu energie z povrchu do okolní kapaliny jako přímou úměru k průměrné teplotní změně mezi povrchem a kapalinou. Pro FV panel ve vzduchu je celková konvektivní výměna energie z povrchu panelu dána vztahem:

$$q_{conv} = -h_c \cdot A \cdot (T_{panel} - T_{okolní}) \quad (7.7)$$

Hodnota součinitele přestupu tepla prouděním h_c závisí na fyzikální situaci. Proudění může být kombinací volných a nucených efektů. Při klidných dnech na zakrytých zadních stranách řetězce panelů, je volné proudění převládající složkou. Pokud je přední strana řetězce vystavena větru, je převládající složkou nucené proudění.

Pro volné chlazení (uvažováno převážně turbulentní) je součinitel přestupu tepla prouděním úměrný k dané mocnině rozdílu teplot panelu a vzduchu. Aproximace daná v [34] pro volné proudění z vertikální plochy do vzduchu je pak použita pro výpočet součinitele volného proudění FV panelu:

$$h_{c,volné} = 1,31 \cdot (T_{panel} - T_{okolní})^{\frac{1}{3}} \quad (7.8)$$

Konstanta úměry (1,31) v empirickém vyjádření rovnice (7.8) má jednotku $W/(m^2 K^{3/2})$.

V literatuře pro nucené proudění jsou uváděny hodnoty součinitele přestupu tepla h_c pro rychlost větru 1 m/s od 1,2 W/m^2 [37], 5,8 W/m^2 [38], 9,1 W/m^2 [35].

Pro typické dny je průměrný součinitel přestupu tepla prouděním dán součtem nuceného proudění z přední strany panelu vlivem větru $h_{c,nucené1}$ a nuceného proudění na zadní straně panelu vlivem proudění vzduchu přes ventilátory tepelného čerpadla $h_{c,nucené2}$:

$$q_{proudení} = -(h_{c,nucené1} + h_{c,nucené2}) \cdot A \cdot (T_{panel} - T_{okolí}) \quad (7.9)$$

7.5. Vyrobená elektrická energie

Pro zjednodušení je uvažováno se stejným množstvím vyrobené energie ze všech panelů v celém poli 40 fotovoltaických panelů. Vyrobená energie je modelována pomocí faktoru plnění, který může být stručně popsán jako:

$$P_{out} = C_{FF} \cdot \frac{E \cdot \ln(k_1 \cdot E)}{T_{panel}} \quad (7.10)$$

Kde C_{FF} ... konstanta faktoru plnění (0,82 K.m²)

E ... dopadající sluneční záření [W/m²]

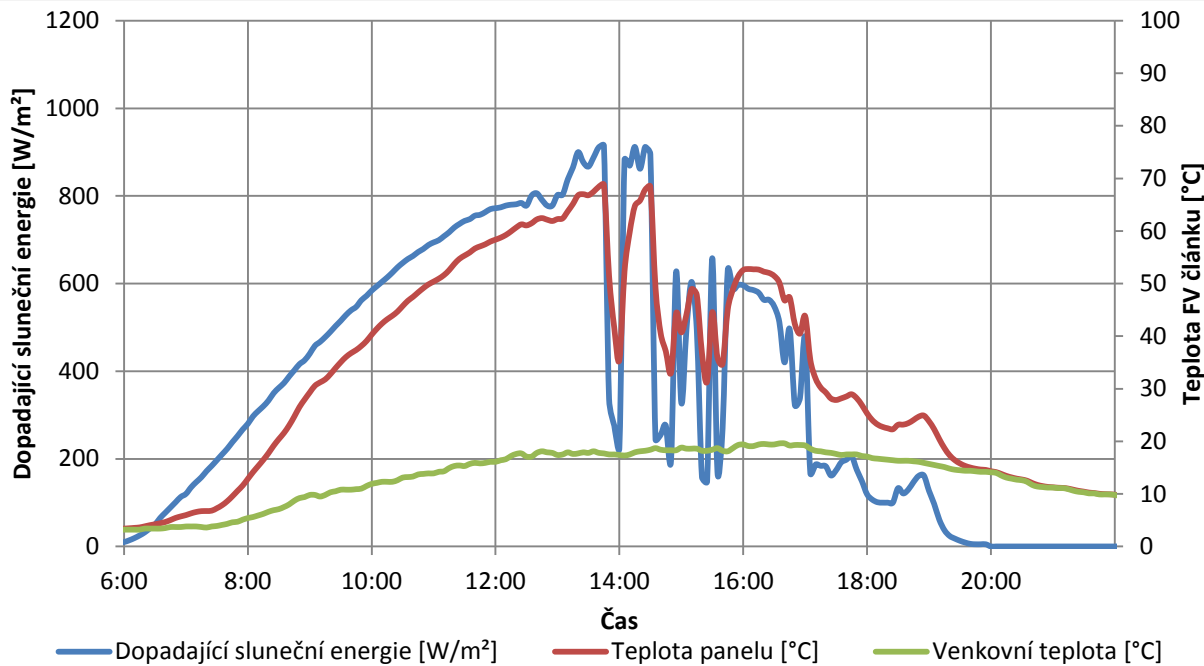
k_1 ... konstanta=10⁶ m²/W

7.6. Teoretický model teploty FV panelu

Dosazením rovnic (7.2), (7.3), (7.6), (7.9) a (7.10) do rovnice (7.1) získáme následující vyjádření změny teploty panelu v podmínkách praktického využití FV dle kapitoly 8:

$$C_{panel} \cdot \frac{dT_{panel}}{dt} = \sigma \cdot A \cdot (\varepsilon_{obloha} (T_{okolni} - \delta T)^4 - \varepsilon_{panel} T_{panel}^4) + \alpha \cdot \Phi \cdot A - C_{FF} \cdot \frac{E \cdot \ln(k_1 \cdot E)}{T_{panel}} - (h_{c,nucen1} + h_{c,nucen2}) \cdot A \cdot (T_{panel} - T_{okoli}) \quad (7.11)$$

Podle naměřených dat z meteostanice na Elektrotechnické fakultě je pak možné při znalosti dopadajícího slunečního záření a teploty okolního vzduchu vyjádřit oteplení fotovoltaického článku. Pro výpočet jsem použil hodnoty součinitele přestupu tepla prouděním pro přední stranu panelu dle [37] $h_{c,nucen1} = 1,2 \text{ W/m}^2$ a pro zadní stranu dle [35] $h_{c,nucen2} = 9,1 \text{ W/m}^2$. Následující graf představuje závislost oteplení FV článku na dopadajícím slunečním záření v průběhu dne (použity hodnoty z 22.4. 2012).



Obr. 7.1 Oteplení FV článku v závislosti na intenzitě slunečního osvětlení

Diferenciální rovnici 7.11 jsem řešil numerickou simulací Eulerovou metodou na časovém intervalu 5 minut, ve kterém byly také naměřeny hodnoty dopadající sluneční energie. Diskretizační chyba při výpočtu se uvažuje minimální, protože na daných časových vzorcích známe přesnou hodnotu sluneční energie.

8. Návrh integrovaného systému s TČ pro využití v praxi

Výše naměřená data a uváděné skutečnosti jsem použil pro návrh teoretického využití spolupráce tepelného čerpadla a fotovoltaických panelů. Jako příkladovou studii uvažuji vytápění a ohřev užitkové vody v bytovém domě, na jehož střeše je instalována malá fotovoltaická elektrárna. Pro výpočet je důležité stanovit vstupní hodnoty energetické náročnosti objektu:

Tepelná ztráta objektu	$T_{Z_{výp}}$	40 kW
Venkovní výpočtová teplota	T_e	-15 °C
Vnitřní výpočtová teplota	T_i	19 °C
Denní spotřeba užitkové vody	$V_{TUV,den}$	2000 litrů
Denní energetická náročnost ohřevu užitkové vody ($\Delta T=45^\circ C$)	$Q_{TUV,den}$	378 MJ

Tabulka 8.1 Vstupní údaje pro výpočet energetické náročnosti budovy

Podle těchto údajů je možné navrhnout velikost kaskády tepelných čerpadel a záložního zdroje. Jako hlavní zdroj tepla uvažuji tepelná čerpadla od českého výrobce AC Heating. Jedná se o splitové provedení TČ technologie vzduch-voda s plynulým řízením otáček dvojitého rotačního kompresoru. V TČ je použito chladivo R410a. Výrobce mi poskytl veškerá potřebná data, především výkonové poměry a údaje o COP při venkovních teplotách od -15 °C do 7 °C a teplotě topné vody od 45 °C do 55 °C. Podle těchto výkonů jsem nadimenzoval topný zdroj následujícím způsobem:

Velikost kaskády tepelných čerpadel	k_s	2× Convert AW28-3P
Záložní elektrokotel o výkonu	P_{EK}	36 kW
Velikost zásobníků TUV	V_{TUV}	2× 1000 litrů

Tabulka 8.2 Dimenzování kaskády tepelných čerpadel

Teplota topné vody v otopné soustavě se během roku řídí ekvitermní křivkou, což umožňuje díky invertorové technologii přizpůsobit aktuální topný výkon tepelného čerpadla tepelné náročnosti budovy.

Dalším krokem je stanovení požadovaných provozních parametrů:

Požadovaný výkon pro výrobu TUV	P_{TUV}	16 kW
Doba ohřevu užitkové vody	t_{TUV}	6,6 hodiny

Tabulka 8.3 Provozní požadavky na ohřev užitkové vody

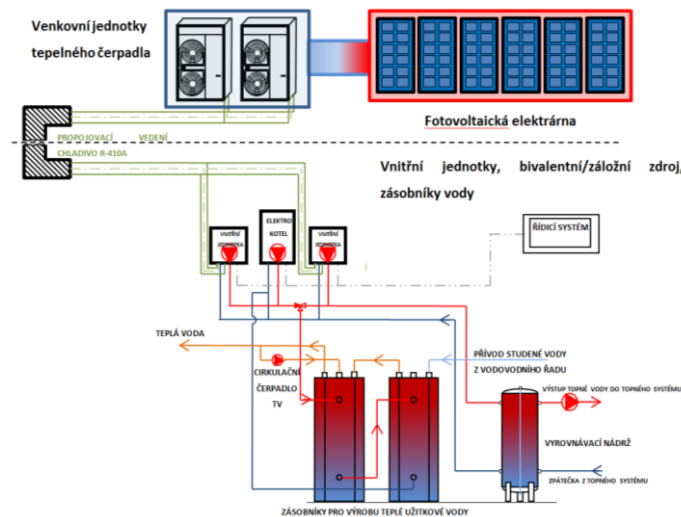
Podle vypočítané doby ohřevu 2000 l užitkové vody jsem v dalším výpočtu uvažoval natápění zásobníku TUV celý rok mezi 9:00 a 16:00 hodinou i s ohledem na dobu slunečního svitu během dne.

Takto jsou tedy stanoveny podmínky pro provoz tepelného čerpadla a nyní je možné určit parametry a předpokládané vstupní údaje FV elektrárny:

Absorpční plocha panelů	S_{FV}	20 m ²
Teoretická elektrická účinnost při teplotě panelu 12 °C	η_{teor}	8 %
Teoretický podíl dopadající energie přeměněný na teplo	$\eta_{teplná}$	80 %
Teoretický podíl odražené energie	η_{odraz}	7 %
Teoretický podíl prostupující energie	$\eta_{prostup}$	5 %

Tabulka 8.4 Uvažované parametry FV elektrárny

Na následujícím obrázku je zjednodušený návrh řešení vytápění bytového domu:



Obr. 8.1 Návrh zapojení topného zdroje a FV elektrárny na bytovém domě

Propojení tepelného čerpadla a fotovoltaické elektrárny je uvedeno pouze schematicky. Podrobný návrh je potřeba řešit i s ohledem na způsob provozu, tedy zjednodušeně „odkud budeme nízkopotenciální teplo odebírat a kam budeme ochlazený vzduch vypouštět“.

9. Ekonomicko-technické hodnocení na základě simulace

Podle vstupních údajů uvedených v předchozí kapitole a teoretického modelu oteplení FV článku podle kapitoly 7, je možné simulovat provoz tepelného čerpadla a FV panelů na bytovém domě. Myšlenka využití spolupráce těchto dvou prvků je založena na předpokladu, že v okamžiku, kdy tepelné čerpadlo topí, tak je zároveň chlazen FV panel. Pokud tedy není požadavek na vytápění nebo ohřev užitkové vody, nedochází ke chlazení FV panelu.

Pro co největší přiblížení reálným hodnotám spotřeby elektrické energie tepelnými čerpadly a vyrobené elektrické energie FV panely, jsem použil hodnoty venkovních teplot a dopadajícího solárního záření naměřené na meteorologické stanici umístěné na budově elektrotechnické fakulty v Plzni v průběhu roku 2010.

Pro porovnání výsledných hodnot budou dále uvažovány dny:

20. prosinec 2010 – nejchladnější den roku, průměrná teplota je -13 °C , průměrná intenzita dopadajícího slunečního záření je 130 W/m^2 ,

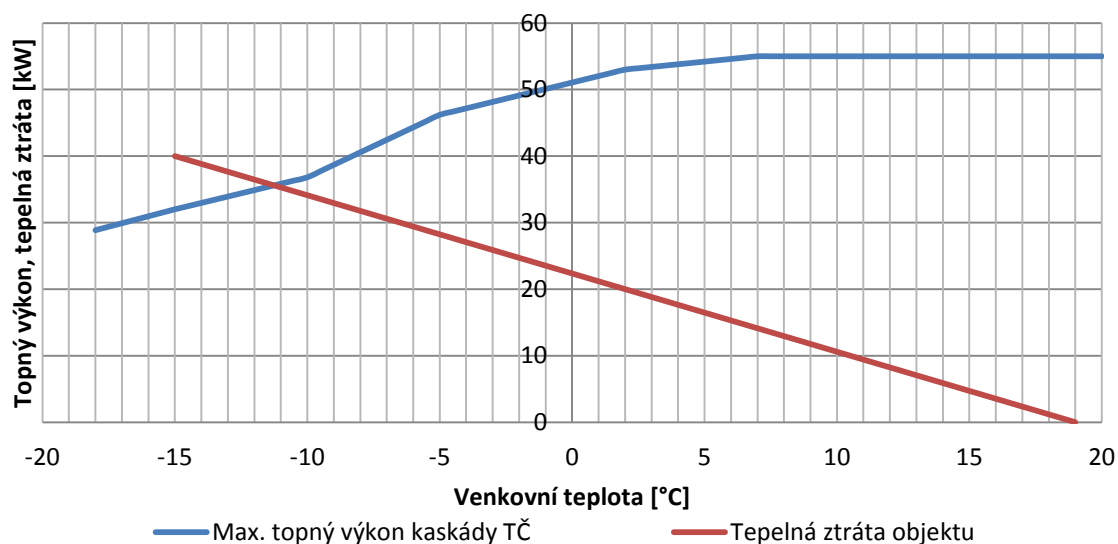
12. leden 2010 – průměrná teplota je 0 °C , průměrná intenzita dopadajícího slunečního záření je 49 W/m^2 ,

31. březen 2010 – průměrná teplota je $10,6\text{ °C}$, průměrná intenzita dopadajícího slunečního záření je 357 W/m^2 ,

2. srpen 2010 – nejteplejší den roku, průměrná teplota je $22,2\text{ °C}$, průměrná intenzita dopadajícího slunečního záření je 328 W/m^2 .

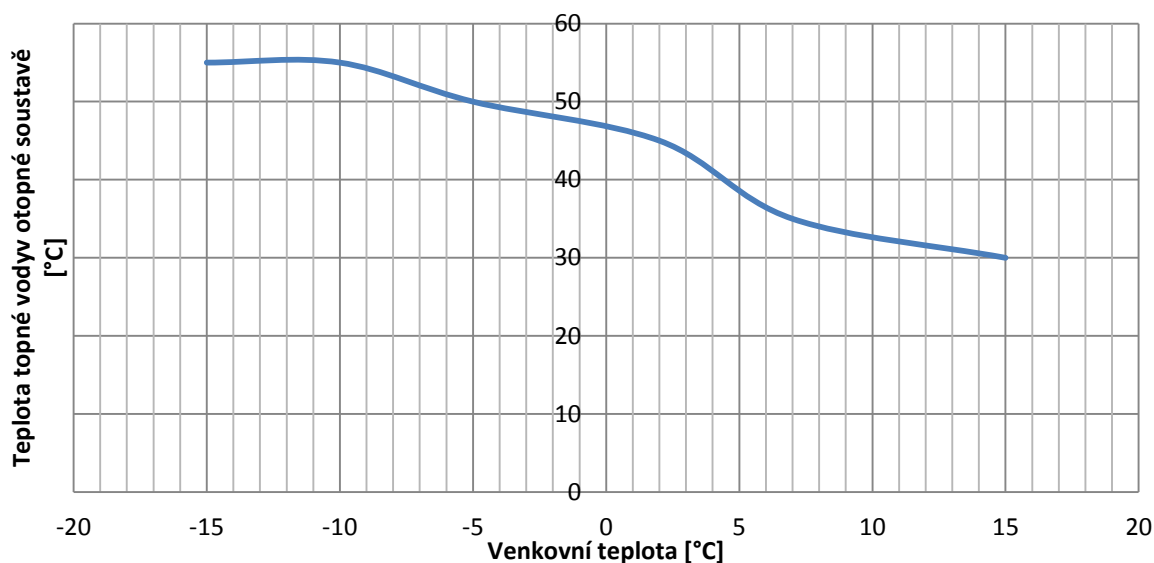
9.1. Definování vstupních parametrů simulace

Nejprve je zapotřebí stanovit několik základních předpokladů. Výkon kaskády tepelných čerpadel je díky invertorové technologii upravován podle aktuálního tepelného požadavku objektu. Kaskáda tepelných čerpadel topí samotná až do tzv. bodu bivalence (teplota, při které je tepelná ztráta shodná s tepelným výkonem kaskády tepelných čerpadel), kdy je připínán záložní elektrokotel. Do bodu bivalence tedy tepelná čerpadla běží na snížený výkon, rovnající se tepelné ztrátě objektu. Následující graf znázorňuje závislost topného výkonu tepelného čerpadla Convert AW28-3P a tepelné ztráty na venkovní teplotě [8]:



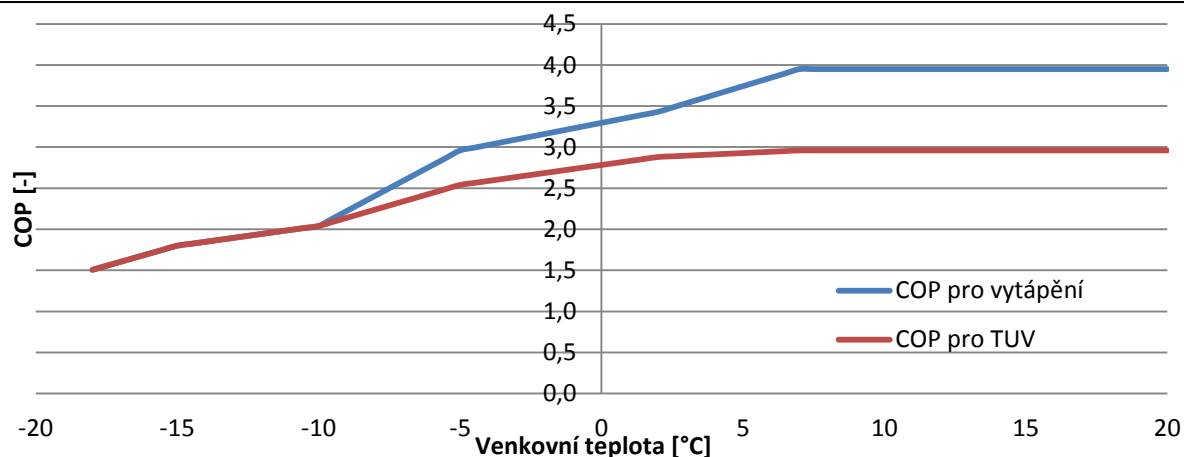
Obr. 9.1 Závislost topného výkonu kaskády tepelných čerpadel 2x Convert AW28-3P a tepelné ztráty bytového domu na venkovní teplotě,

Teplota topné vody v otopné soustavě z tepelného zdroje se řídí ekvitermní křivkou, která je nastavena následujícím způsobem:



Obr. 9.2 Uvažovaná ekvitermní křivka topného zdroje

Posledním vstupním údajem pro simulaci je topný faktor tepelného čerpadla. Ten má dle podkladů od výrobce [8] při respektování ekvitermní křivky následující závislost na venkovní teplotě:



Obr. 9.3 Závislost topného faktoru tepelných čerpadel pro vytápění a výrobu TUV na venkovní teplotě při respektování ekvitermní křivky

Topný faktor pro ohřev užitkové vody je nižší s ohledem na požadavek vysoké teploty topné vody během celého roku.

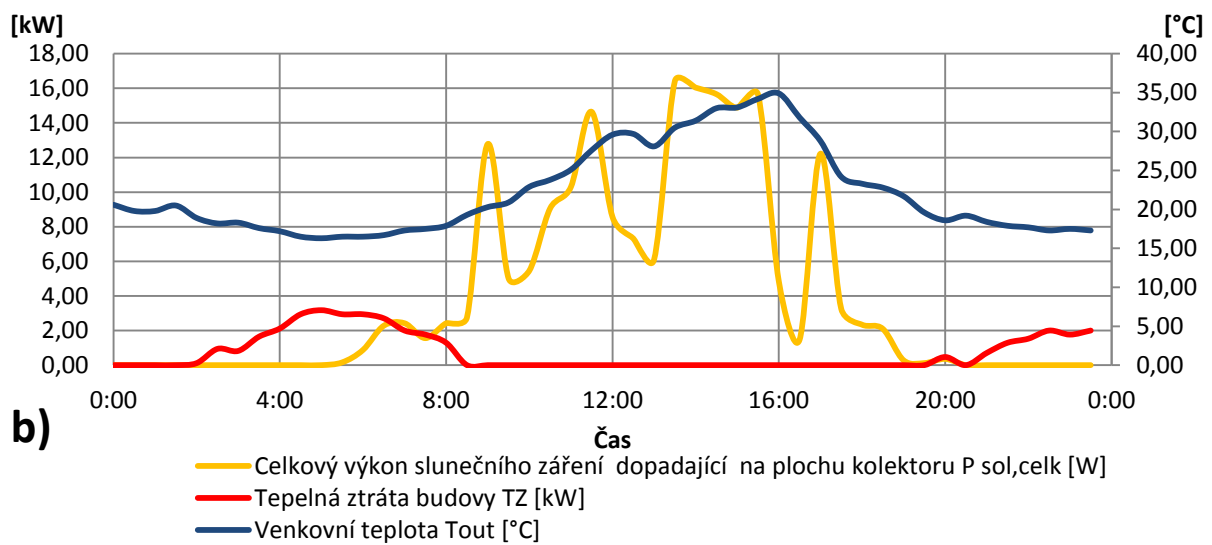
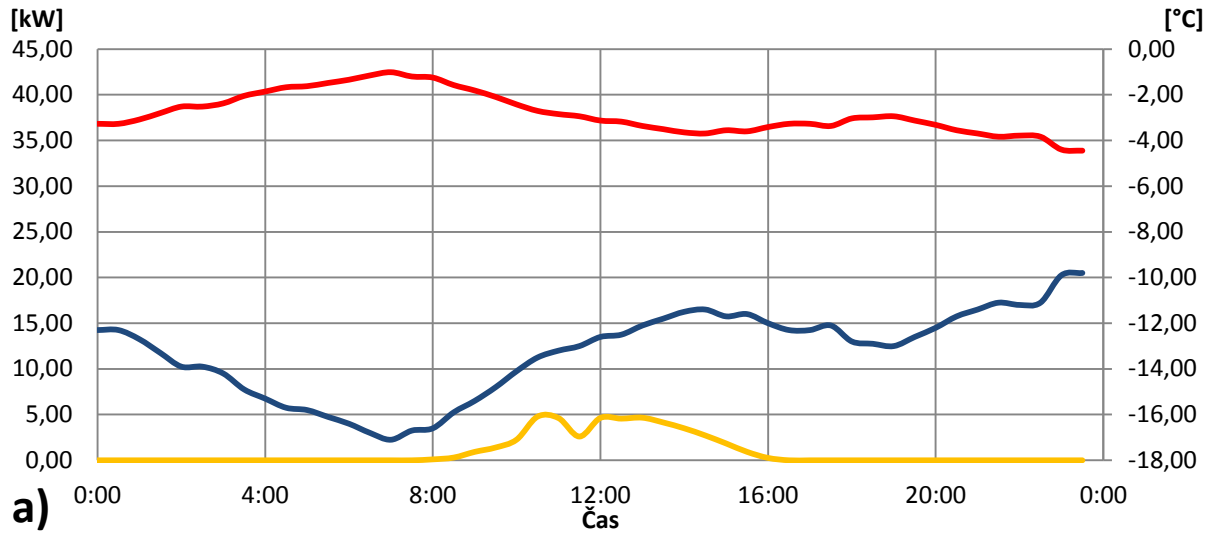
Podle údajů výrobce tepelných čerpadel dochází k navýšení topného faktoru o 20 % při poklesu vybuzení invertoru na 50 %. Tento fakt je zahrnut do všech výpočtů.

9.2. Porovnání výsledků simulace referenčních dnů 20. prosince 2010 a 2. srpna 2010

Referenční dny je možné pro zjednodušení nazvat letním provozem (2. srpen) a zimním provozem (20. prosinec). Pro porovnání jsou ostatní referenční dny uvedeny v příloze.

Nyní je potřeba uvést naměřené hodnoty venkovní teploty, dopadajícího výkonu slunečního záření a pro úplnost i dopočítanou okamžitou tepelnou ztrátu objektu přepočítanou ze vstupních údajů bytového domu viz. Tabulka 8.1 a skutečné venkovní teploty podle následujícího vztahu:

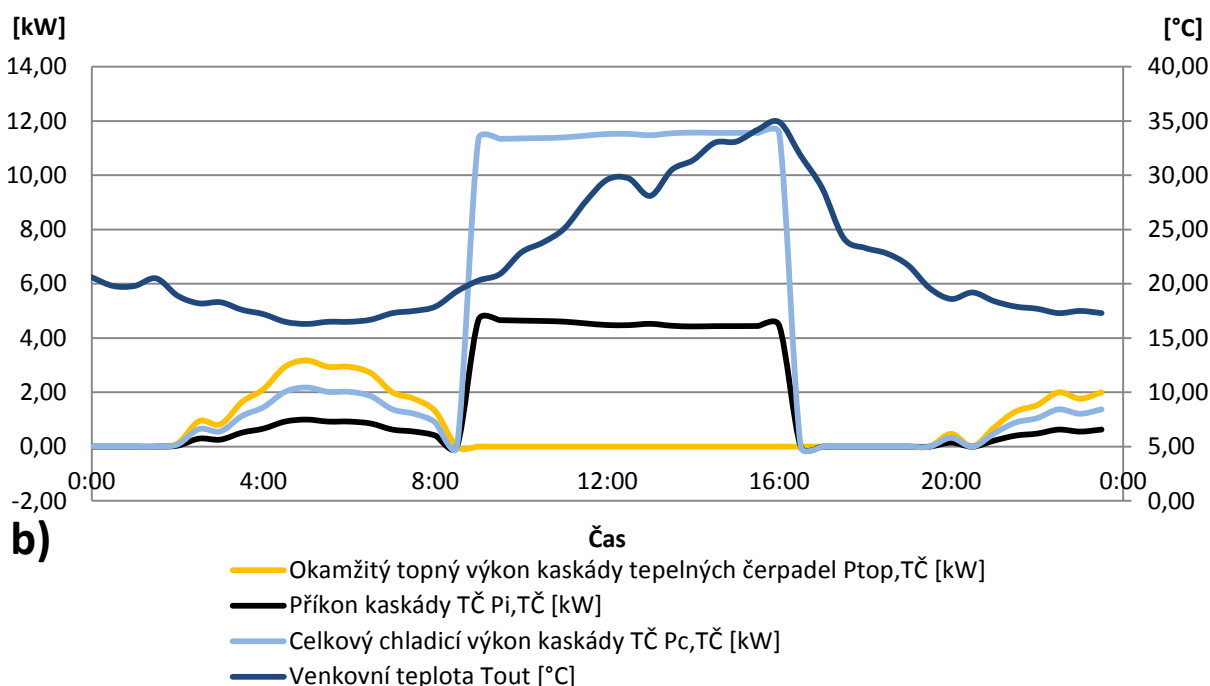
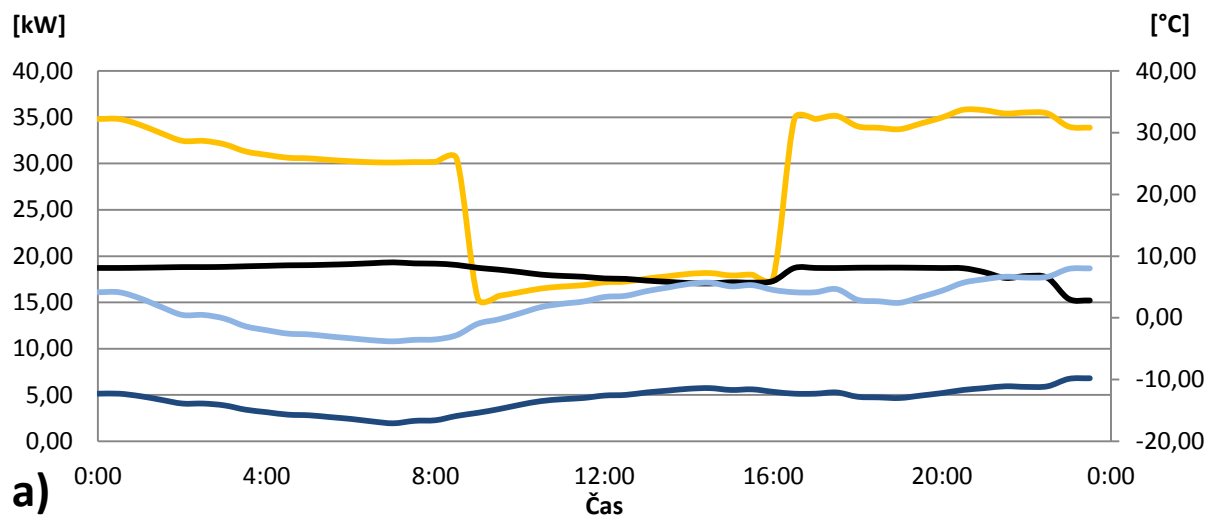
$$TZ_T = \frac{TZ_{výp}}{T_i - T_e} \cdot (T_e - T_{OUT}) \quad (9.1)$$



Obr. 9.4 Závislost naměřených vstupních hodnot a tepelné ztráty na venkovní teplotě, a) zimní provoz, b) letní provoz

Dopadající výkon slunečního záření na celkovou plochu fotovoltaických panelů je dán součinem intenzity slunečního záření a absorpční plochy panelů S_{FV} .

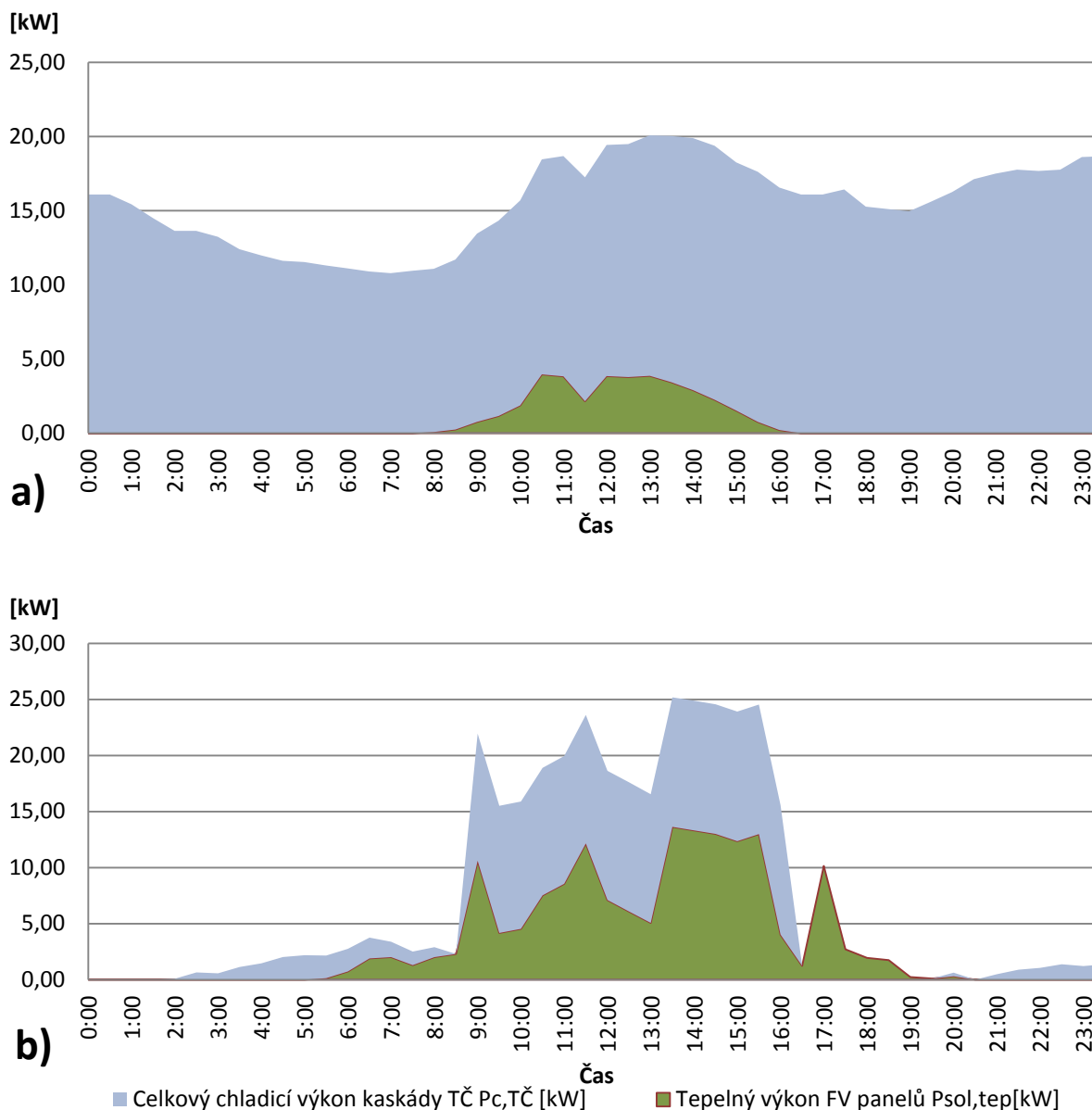
Jak bylo uvedeno v kapitole 3.2.6 je topný výkon tepelného čerpadla roven součtu odebrané tepelné kapacity okolnímu prostředí $P_{c,TČ}$ (dále jen chladicí výkon) a příkonu tepelného čerpadla $P_{i,TČ}$. Výkonové a příkonové poměry jsou v uvažovaném dni následující:



Obr. 9.5 Výkonové poměry na kaskádě TČ, a) zimní provoz, b) letní provoz

Pokles okamžitého topného výkonu do otopné soustavy v době od 9:00 do 16:00 je způsoben ohřevem užitkové vody, kdy dojde k překlopení trojcestného ventilu (viz. Obr. 8.1) a k dispozici pro vytápění je tedy pouze jedna jednotka tepelného čerpadla.

V režimu ohřevu užitkové vody je nastaven konstantní topný výkon 16 kW po celý rok. Tímto výkonem je užitková voda ohřívána právě po dobu cca 7 hodin denně, aby v letních měsících byl po co největší část dne, kdy je největší sluneční osvit, k dispozici chladičí výkon tepelného čerpadla. Další grafy představují pokrytí topného výkonu získaného přeměnou části dopadajícího slunečního záření na fotovoltaické panely:



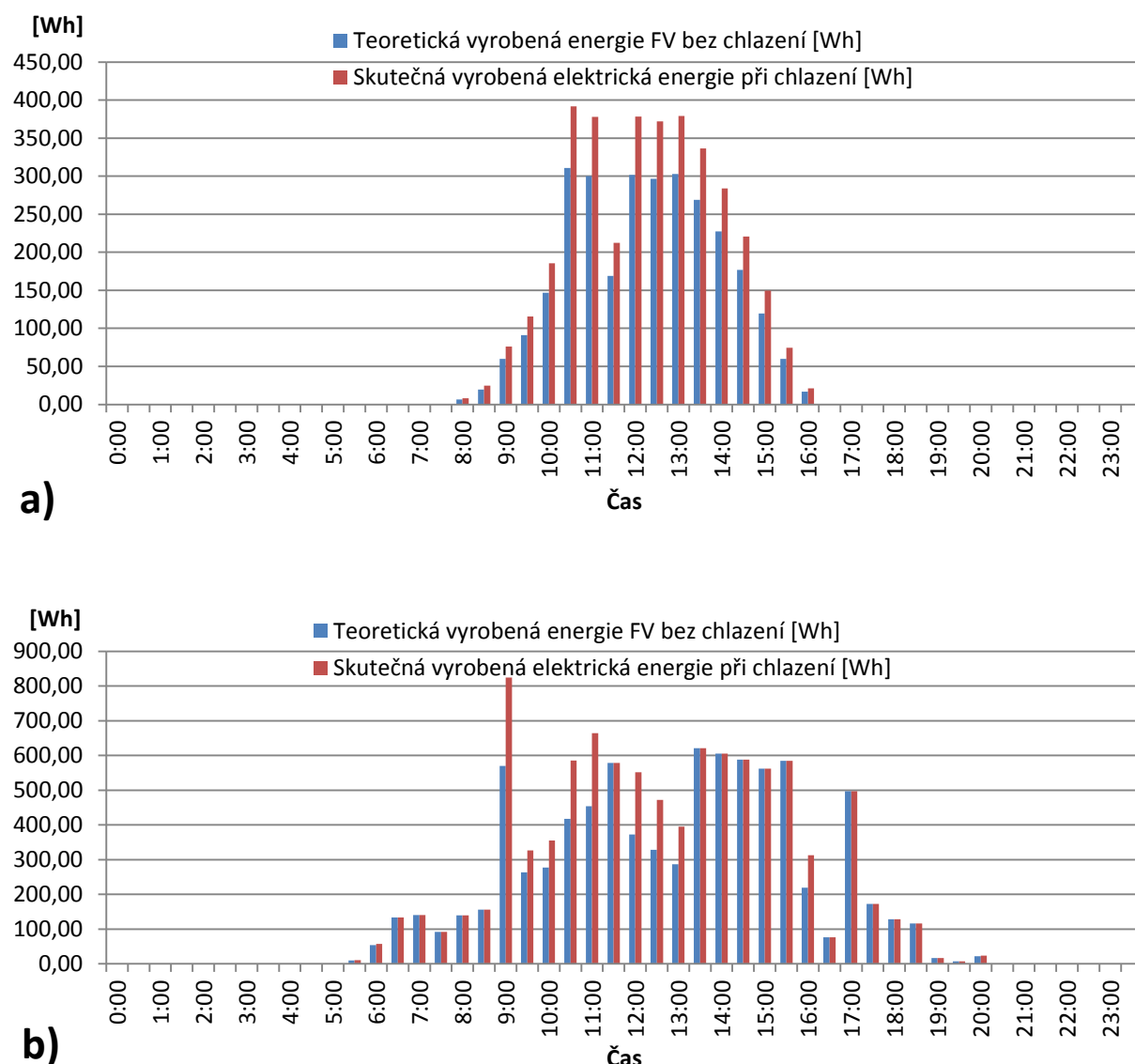
Obr. 9.6 Pokrytí topného výkonu fotovoltaického panelu chladicím výkonem tepelného čerpadla, a) zimní provoz, b) letní provoz

Tepelný výkon panelů je založen na předpokladu, že 80 % dopadajícího slunečního záření na celou plochu kolektorů je přeměněno na teplo (viz. Tabulka 8.4).

$$P_{\text{sol,tep}} = \eta_{\text{tepelná}} \cdot P_{\text{sol,celk}} \quad (8.2)$$

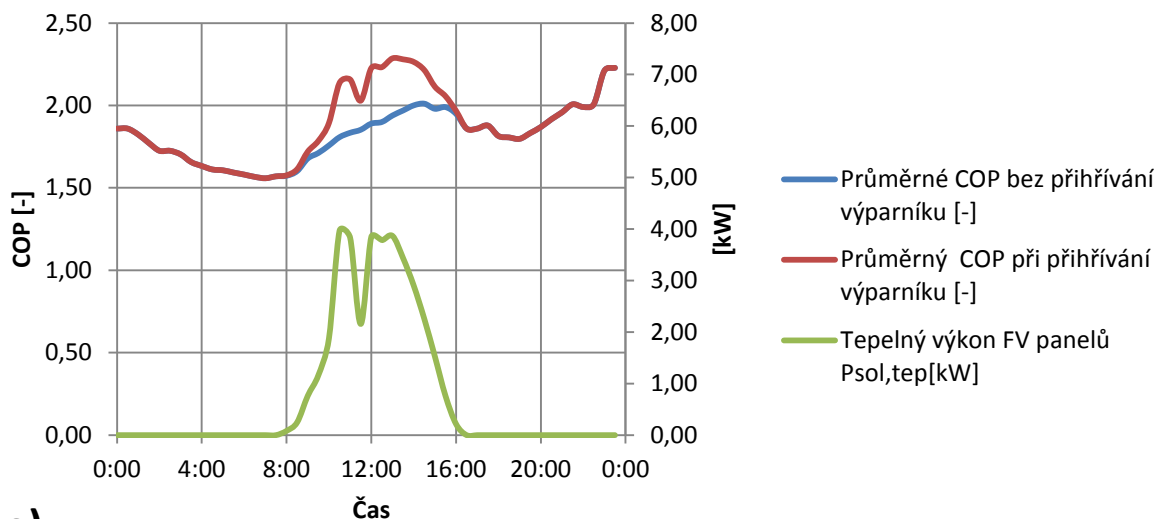
V době, kdy chladicí výkon TČ převyšuje topný výkon FV, je možné uvažovat dosažení požadované teploty FV panelů, tedy 13 °C a méně (v zimním období). S touto teplotou bude dále počítáno jako s referenční, s ohledem na výsledky měření na modelu podle kapitoly 6. S tím je spojený i předpokládaný nárůst účinnosti FV panelu při dosažení teploty 13 °C, který vychází z odhadované teploty FV panelu a naměřeného navýšení účinnosti uváděného na

Obr. 6.14. Odhadovaná teplota FV panelů závisí na venkovní teplotě a na intenzitě slunečního záření. Teploty jsou tedy simulovány v rozmezí od venkovní teploty do cca 93 °C na povrchu FV panelu.

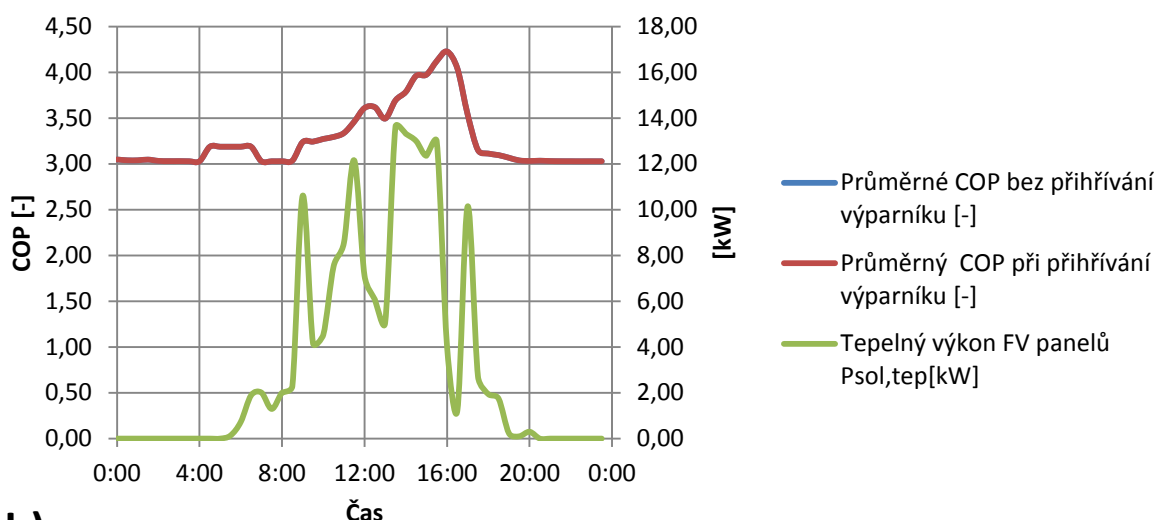


Obr. 9.7 Porovnání teoretického množství vyrobené energie FV panelem v průběhu dne, a) v zimním období, b) v letním období

Zároveň s navyšováním účinnosti FV panelu dochází i ke zvýšení topného faktoru tepelného čerpadla při nasávání předehřátého vzduchu z prostoru FV panelů. Následující graf představuje průběh průměrného COP (vytápění + ohřev užitkové vody) bez předehřevu a s předehřevem výparníku:



a)



b)

Obr. 9.8 Porovnání topných faktorů bez a s přehříváním výparníku, a) v zimním období, b) v letním období

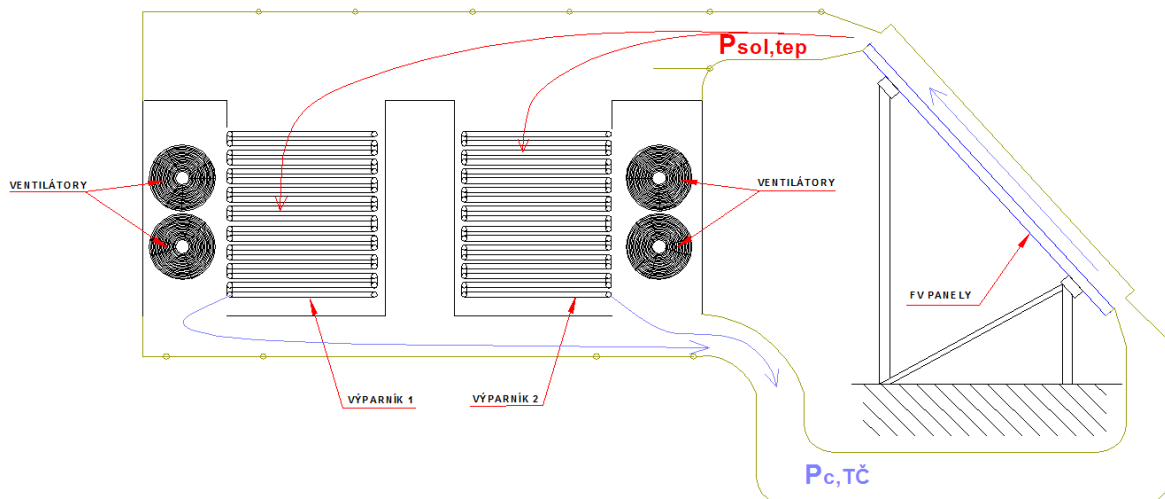
Výpočet COP s přehříváním vychází z teploty na vstupu výparníku, která je navýšena o energii dopadajícího slunečního záření na povrch panelů, přeměněnou na teplo. Navýšení vstupní teploty vzduchu vychází ze vztahu:

$$\Delta t = \frac{P_{sol,celk}}{Q_{vzd} \cdot c_{vzd}} + T_{OUT} \tag{9.3}$$

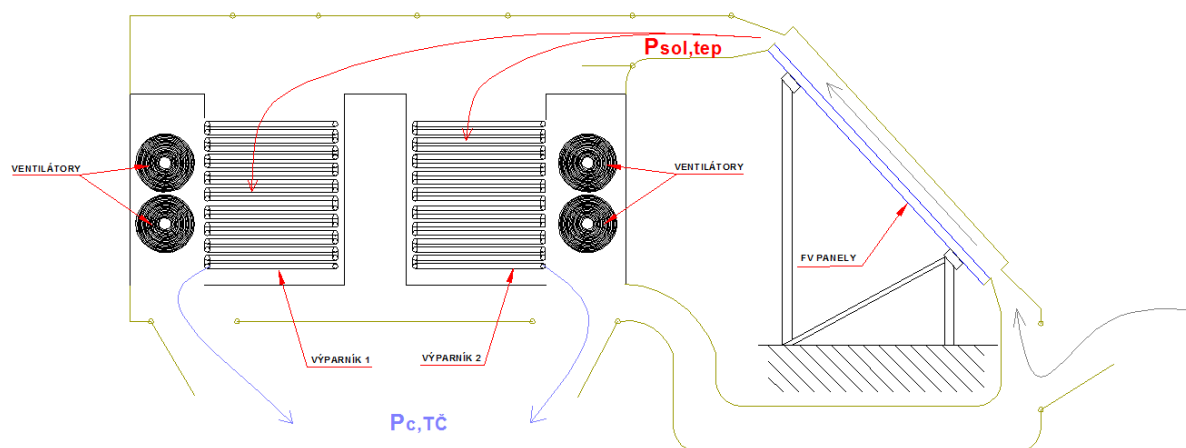
kde Q_{vzd} ... požadovaný průtok vzduchu výparníkem tepelného čerpadla [m^3/s]

c_{vzd} ... měrná tepelná kapacita vzduchu při 20 °C [J/kg.K]

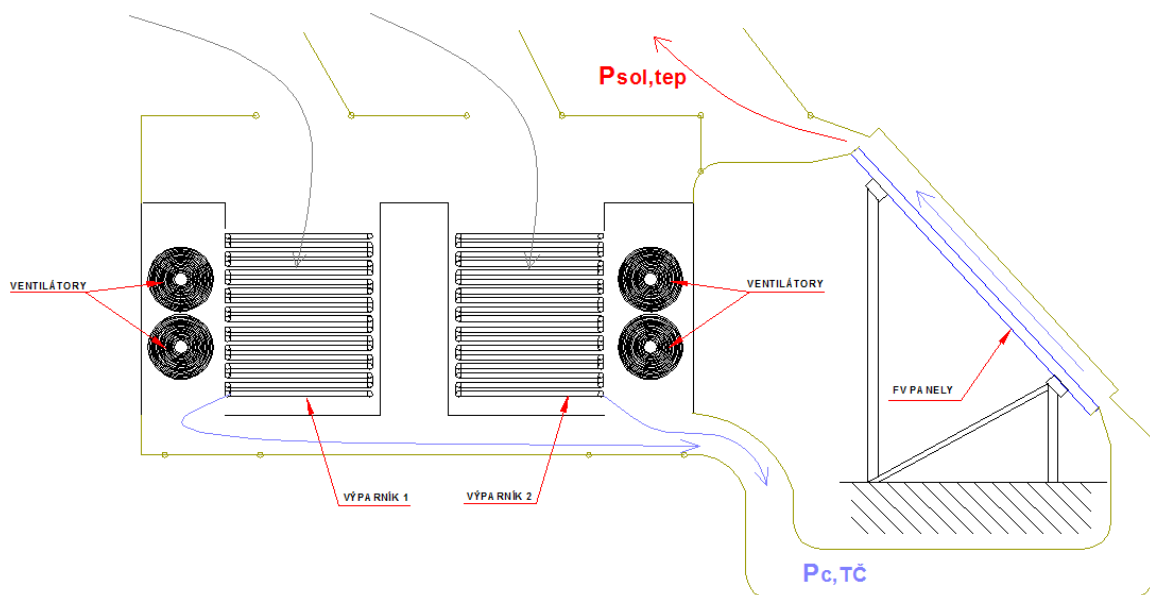
Celá sestava tepelného čerpadla s přehřívání výparníku odpadním teplem z FV panelů musí být doplněna vzduchotechnickými klapkami pro vyrovnávání teplotních bilancí uvnitř okruhu a tím optimalizaci chodu celého zařízení. Porovnání provozních stavů z hlediska energetické bilance je pak následující:



Obr. 9.9 Rovnovážný stav $P_{sol,tep} \approx P_{c,TČ}$



Obr. 9.10 Chladicí výkon TČ je výrazně vyšší než topný výkon FV $P_{sol,tep} \ll P_{c,TČ}$



Obr. 9.11 Bezpečnostní opatření proti přehřátí výparníku $P_{sol,tep} \gg P_{c,TČ}$

9.3. Porovnání ekonomiky provozu v průběhu celého roku

Ze všech výše uvedených zjištění a příkladů výpočtu uvedeného je možné následně vyjádřit ekonomické hodnocení provozu tohoto teoretického modelu. V následující tabulce jsou shrnuty předpokládané úspory vzniklé při provozu.

Měsíc	T_{AVG} [°C]	COP_{AVG} [-]	E_{FV} [kWh]	$E_{FV,CH}$ [kWh]	$W_{Tč}$ [MWh]	$W_{Tč,CH}$ [MWh]	W_{EK} [kWh]	$W_{EK,CH}$ [kWh]
Leden	2,33	2,90	59,7	69,2	6,3	5,7	33,0	4,6
Únor	2,87	2,94	100,2	116,1	4,9	4,3	17,5	6,9
Březen	4,02	3,01	177,8	206,1	5,6	4,9	0,00	0,00
Duben	9,06	3,23	252,8	295,5	3,6	3,2	0,00	0,00
Květen	14,83	3,38	94,0	106,0	0,7	0,6	0,00	0,00
Červen	15,68	3,36	369,0	415,2	2,0	1,9	0,00	0,00
Červenec	18,62	3,41	403,0	460,4	1,6	1,6	0,00	0,00
Srpen	19,86	3,43	403,0	470,8	1,4	1,4	0,00	0,00
Září	15,77	3,36	246,3	310,0	2,0	2,0	0,00	0,00
Říjen	8,27	3,19	123,6	142,6	4,2	3,8	0,00	0,00
Listopad	6,35	3,16	69,8	79,0	4,5	4,1	0,00	0,00
Prosinec	-0,43	2,75	45,3	53,6	7,4	6,7	641,5	386,4
Celkem			2345	2724	44,2	40,1	692,0	398,0

Tabulka 9.1 Přehled výroby elektrické energie z FV elektrárny a spotřeby tepelného čerpadla a záložního zdroje před a po provedení uvažovaných opatření

- kde T_{AVG} ... průměrná teplota
 COP_{AVG} ... průměrná hodnota topného faktoru
 E_{FV} ... vyrobená elektrická energie FV elektrárnou bez chlazení
 $E_{FV,CH}$... vyrobená elektrická energie FV elektrárnou s chlazením
 $W_{TČ}$... spotřeba elektrické energie tepelného čerpadla bez předehřevu výparníku TČ
 $W_{TČ,CH}$... spotřeba elektrické energie tepelného čerpadla s předehřevem výparníku TČ
 W_{EK} ... spotřeba elektrické energie záložního zdroje bez předehřevu výparníku TČ
 $W_{EK,CH}$... spotřeba elektrické energie záložního zdroje s předehřevem výparníku TČ

Současná cena výkupu elektrické energie z fotovoltaických elektráren je 2,43 Kč/kWh (Zdroj ceník ČEZ) a stávající cena elektrické energie v nízkém tarifu od společnosti ČEZ v sazbě D56d činí 2,752 Kč/kWh (Zdroj ceník ČEZ).

Měsíc	Měsíční navýšení zisku z fotovoltaické elektrárny	Měsíční úspora na provozu tepelného čerpadla s předehřevem výparníku	Měsíční úspora při provozu záložního zdroje
	Kč	Kč	Kč
Leden	23	1667	78
Únor	39	1535	29
Březen	69	1924	0
Duben	104	1079	0
Květen	29	168	0
Červen	112	399	0
Červenec	139	195	0
Srpen	165	98	0
Září	155	285	0
Říjen	46	1028	0
Listopad	22	963	0
Prosinec	20	1937	702
Celkem	923	11279	809

Tabulka 9.2 Ekonomické zhodnocení provozu

Po provedení všech opatření je teoretický nárůst vyrobené energie fotovoltaických panelů cca o 14 %. Naopak spotřeba elektrické energie při předehřevu výparníku výrazně poklesne, a to o cca 9 % a spotřeba elektrické energie pro záložní zdroj poklesne o 43 %.

10. Závěr

Tato práce vznikla s cílem ověřit teoretický předpoklad navýšení účinnosti FV článku při jeho klesající teplotě. V literatuře jsou velice často uváděny odlišné hodnoty navýšení účinnosti při chlazení za specifických podmínek, a proto měření na modelu probíhalo při standartních podmínkách, se kterými se v praxi setkáváme. Výsledky měření jsou pak snáze přeneseny na výše uvedenou aplikaci pro předehřev vzduchu na výparníku tepelného čerpadla.

Praktickým měřením byl ověřen nárůst účinnosti přeměny světelné energie a energii elektrickou cca 1 %/1 °C vztaženo k účinnosti článku při teplotě 20 °C v rozmezí teplot FV panelu 13 – 70 °C. Tyto poznatky korespondují s měření na FVE na FEL ČVUT v Praze prezentovaným v publikaci [12]. S použitím laboratorních měřicích systémů by bylo možné zajistit průběh měření výkonových charakteristik do teplot i výrazně pod bod mrazu, ovšem vzhledem k praktickým aplikacím je měření, které jsem popsal v této práci, zcela dostačující.

Ve druhé části práce jsem provedl návrh možného využití poznatků o nárůstu účinnosti přeměny energie ve FV článku, a to na teoretickém příkladu aplikace předání přebytečného tepla z FV panelů do výparníku tepelného čerpadla, které slouží pro vytápění bytového domu a přípravu teplé užitkové vody. Při tomto procesu dojde k navýšení průměrného ročního topného faktoru a snížení provozních nákladů na vytápění a ohřevu vody. S nárůstem topného faktoru souvisí i prodloužení období, ve kterém tepelné čerpadlo vytápí objekt samostatně bez dopomoci bivalentního zdroje v podobě elektrického kotle. Pak dojde i ke snížení spotřeby záložního zdroje.

I když celá práce vychází z praktických poznatků v první části o nárůstu účinnosti FV panelu, tak druhá část práce zahrnující teoretický příklad využití, sebou nese jako každý model několik nepřesností spojených především s údaji o slunečním záření naměřenými v intervalu 30 minut, nezahrnuje faktor znečištění povrchu FV panelů, přírážka na odtávání výparníku TČ je počítána jako konstanta v celém topném období (při teplotách nad 5 °C nedochází ke vzniku námrazy na výparníku), apod.

Shrnutí

Jako hlavní přínos této práce považuji sestavení testovacího modelu pro praktické měření účinnosti fotovoltaických panelů. Následným měřením výkonových parametrů FV panelů jsem ověřil a popsal navýšení jejich účinnosti při snižování jejich teploty. Na základě těchto údajů jsem pak mohl vytvořit teoretický model aplikující poznatky na residenční sektor. Podle vstupních veličin venkovní teplota a sluneční osvit jsem pak mohl simulovat průběh tepelné ztráty bytového domu, který sloužil jako podklad pro výpočet všech provozních parametrů tepelného čerpadla. Pak bylo možné stanovit co nejpřesnější vliv chladicího výkonu tepelného čerpadla na účinnost FV panelů a zároveň určit důsledky předehřevu přívodního vzduchu na výparník tepelného čerpadla na změnu topného faktoru.

Resume

The main contribution of this thesis consists in the construction of a practical testing model for measuring the efficiency of photovoltaic panels. By subsequent measurement of performance parameters of the modules I checked and described the increase of their efficiency by reducing their temperature. On the basis of this information I was able to create a theoretical model applying this knowledge to the residential sector. According to the input variables such as outside temperature and irradiating sun energy, I was able to simulate the development of the heat loss in a residential building, which served as the basis for the calculation of the operating parameters of the heat pump. Then it was possible to determine the precise effect of the cooling performance of the heat pump on the efficiency of PV modules and to identify the effects of the inlet air preheating on the evaporator of the heat pump to change the heat factor.

Návrh na další pokračování

Na tuto práci je možné navázat praktickým měřením změny topného faktoru tepelného čerpadla při různých teplotách přívodního média a různých výkonových podmínkách. Tímto měřením by se upřesnili teoretické poznatky z druhé části této práce. Následně bude potřeba najít nejvhodnější aplikaci spolupráce těchto dvou prvků, tedy tepelného čerpadla (popř. klimatizace) a fotovoltaického panelu.

Praktický model sestavený a popsáný v první části práce může dále sloužit jako praktická úloha při laboratorních měřeních.

11. Literatura

- [1] Treble, F., C.: *Generating electricity from sun*, Pergamon Press, Oxford, 1991
- [2] Merrigan, J. A.: *Sunlight to electricity*, MIT Press, Massachusetts, 1982
- [3] Goswami, D. Y., Kreith F., Kreider, J. F.: *Principles of Solar Engineering*, Taylor & Francis, 1999, ISBN 1-56032-714-6, Philadelphia, 1999
- [4] Kleczek, J.: *Sluneční energie – úvod do helioenergetiky*, SNTL – Polytechnická knihovna, Praha, 1981
- [5] Peterka, J.: *Sluneční energie a tepelná čerpadla [Online]*, [cit. 2.3.2004], <http://www.tzb-info.cz/1845-slunecni-energie-a-tepelna-cerpadla>
- [6] Lázňovský, M.: *Solární elektrárny překonaly výkon Temelína [Online]*, [cit. 17.11.2012], <http://www.technet.cz/solarni-elektrarny-temelin-dfy-tec-technika.aspx?c=A121115-123429-tec-technika-mla>
- [7] Haselhuhn, R.: *Fotovoltaika – budovy jako zdroj proudu*, Technická literatura BEN, ISBN: 978-80-86167-33-6, Praha 2011
- [8] AC Heating: *Projekční podklady pro tepelná čerpadla Convert AW*, firemní materiály, Plzeň, 2013
- [9] Žeravík, A.: *Stavíme tepelné čerpadlo*, EURO-PRINT Přerov, ISBN: 80-239-0275-1, Přerov 2003
- [10] Dvořák, Z., Klazar, L., Petrák, J.: *Tepelná čerpadla*, SNTL, Praha, 1987
- [11] Kminský, J., Vrtek, M.: *Základy chladicí techniky*, učební texty FS VŠB TU, Ostrava. 2002
- [12] Macháček, Z., Benda, V.: *Zkušenosti z provozu fotovoltaického systému FVS 2003A na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze [Online]*, [cit. 2.7.2008], <http://imaterialy.dumabyt.cz/Inzenyrske-site/Zkusenosti-z-provozu-fotovoltaickeho-systemu-FVS-2003A-na-Fakulte-elektrotechnicke-CVUT-vnbspPraze.html>
- [13] Haller, R., Vostracký, Z.: *Impact of radiation on the thermal behaviour of a overhead line rope*, Electric power engineering 2011, VŠB TU, Ostrava, 2011
- [14] Stephan, P., Kabelac, S., Kind, M.: *Heat atlas*, VDI Verlag, ISBN 978-3-540-77876-9, Dusseldorf, 2010
- [15] Auzenet, E., Guiavarch, A., Lokhat, I., Claudon, F.: *Improving the Energy by Coupling of a Heat Pump and Hybrid PV-T Panels [Online]*, [cit.04/2013], <http://www.rehva.eu>
- [16] Kern, Jr.E.C, Russell, M.C.: *Combined Photovoltaic and Thermal Hybrid system*, Proc.13th IEEE Photovoltaic Specialist, Washington DC, USA, 1978.

-
- [17] Zondag, H.A., Vries, D.W., Van Helden, W.G.J., Van Zolingen, R.J.C., Van Steenoven, A.A.: *The thermal and electrical yield of A PV-thermal collector*, International journal of solar energy, vol-72, No.2, 2002
- [18] Anand S. J., Arvind, T.: *Energy and Exergy efficiency of a hybrid photovoltaic –thermal (PV/T)air collector*, International Journal of Renewable Energy, vol-32, 2007
- [19] Anderson, T. N., Duke, M., Carson, J. K.: *Designing Photovoltaic/Thermal solar collectors for Building Integration*, Solar Energy: Rearch Technology and Applications, ISBN:978-1-60456-739-7, Nova science Publishers, 2008
- [20] Skoplaki, J., Palyvos, A.: *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations*, Solar Energy 83, 2009
- [21] Tonui, K., Tripanagnostopoulos, Y.: *Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation*, Renewable Energy 32, 2007
- [22] Kumar, R., Rosen, M.A., *Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins*, Applied Thermal Engineering 31, 2011
- [23] He, W., Zhang Y., Ji, J.: *Comparative experiment study on photovoltaic and thermal solar system under natural circulation of water*, Applied Thermal Engineering 31, 2011
- [24] Tiwari, A., Sodha, M.S.: *Performance evaluation of hybrid PV/thermal water/ air heating system: a parametric study*, Renewable Energy 31, 2006
- [25] Duffie, A., Beckman, W.A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*, third ed.Wiley, New York, USA, 2006.
- [26] Ji, J., Pei, G., Chow, T., Liu, K., He, H., Lu, J., Han, C.: *Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system*, Solar Energy 82, 2008
- [27] Ji, J, Liu, K., Chow, T., Pei, G., He, W., He, H.: *Performance analysis of a photo-voltaic heat pump*, Applied Energy 85, 2008
- [28] Cartmell, B. P., Shankland, N. J., Fiala, D., Hanby, V.: *A multi-operational ventilated photovoltaic and solar air collector: application, simulation and initial monitoring feedback*, Solar Energy, 2004
- [29] Charalambous, P., Kalogirou, S., Maidment, G., Yiakoumetti, K.: *Optimization of the photovoltaic thermal (PV/T) collector absorber*. Solar Energy, 2011
- [30] Nelson, J., Balakrishnan, A., Murthy, S. S.: *Parametric studies on thermally stratified chilled water storage systems*, Applied Thermal Engineering, 1999

- [31] Thygesen, R., Karlsson, B.: *Simulation and analysis of a solar assisted heat pump system with two different storage types for high levels of PV electricity self-consumption*, Solar Energy vol. 103, 2014
- [32] Shahsavari, A., Salmanzadeh, M., Ameri, M., Talebizadeh, P.: *Energy saving in buildings by using the exhaust and ventilation air for cooling of photovoltaic panels*, Energy and Buildings, Volume 43, Issue 9, 2011
- [33] Mastný, P.: *Tepelná čerpadla v kombinovaných tepelných systémech*, Doktorská práce, VUT Brno, 2006
- [34] Holman, J. P.: *Heat Transfer*, McGraw-Hill, 1992
- [35] Schott, T.: *Operational temperatures of PV modules*, 6th PV Solar Energy Conference, str. 392–396, 1985
- [36] Liu, B. Y. H., Jordan, R. C.: *The long term average performance of flat-plate solar energy collectors*, Solar Energy 7, 1963
- [37] ASHRAE: *ASHRAE Handbook: Fundamentals*, 1989
- [38] Anis, W. R., Mertens, R. P., Van Overstraeten, R.: *Calculation of solar cell operating temperature in a flat plate PV array*, 5th E.C. PV Solar Energy Conference, str.520–524, 1983

Práce na projektech

Projekt Výzkumná centra MŠMT 1M06059 „Progresivní technologie a systémy pro energetiku“ – doba řešení 2008 – 2011

Projekt ČEPS a.s. „Možnosti proudového zatěžování vedení VVN/ZVN vyplývající z naměřených (vypočtených) teplot vodičů v závislosti na meteorologických podmínkách provozu vedení“ – doba řešení 2010 – 2011

Projekt ČEZ - Zelená energie „Tepelné čerpadlo se solárním přehříváním výparníku“ – doba řešení 2010-2011

Seznam publikovaných prací

[1] Polívka, J., Vostracký, Z., Korecký, M.: *Energy storage technologies and their application on transportation system*, Advances in Energy Research: Energy and Power Engineering, Chapter 16, strana 425-448, ISBN 978-1-62257-534-3, Nova Science Publishers, USA, 2012

[2] Polívka, J.: *Energy Storage in Smart Grids*, Electric Power Engineering and Ecology - Selected Parts I., strana 67-68, ISBN 978-80-7300-417-0, BEN – Technická literatura Praha, 2011

[3] Polívka, J., Vostracký, Z., Haller, R., Kožený, J., Píclová, P., Krutina, A., Šnajdr, J., Rot, D., Sedláček, J., Bohm, V.: *Možnosti proudového zatěžování vedení vvn/zvn - II.etapa*, Výzkumná zpráva ČEPS a.s., strana 27, Plzeň, 2011

[4] Polívka, J., Vostracký, Z., Haller, R., Kožený, J., Píclová, P., Krutina, A., Šnajdr, J., Rot, D., Sedláček, J., Bohm, V.: *Možnosti proudového zatěžování vedení vvn/zvn - I.etapa*, Výzkumná zpráva ČEPS a.s., strana 44, Plzeň, 2011

[5] Polívka, J., Vostracký, Z., Píclová, P., Krutina, A., Šnajdr, J.: *Increasing of transmission ability at high voltage overhead lines ampacity model*, Proceedings of the 12th International Scientific Conference – Electric Power Engineering 2011, strana 53-56, ISBN 978-80-248-2393-5, Technická univerzita Ostrava, 2011

[6] Polívka, J.: *Energy Storage in Smart Grids*, Renewable Energy Sources 2011, strana 163-165, ISBN 978-80-261-0010-2, ZČU Plzeň, 2011

[7] Polívka, J., Vostracký, Z., Píclová, P., Krutina, A., Šnajdr, J., Kadera, M., Velek, J.: *Potenciální proudové zatížení přenosového řetězce*, Proceedings of the 6th International

Scientific Symposium on Electrical Power Engineering 2011, strana 92-95, ISBN 978-80-553-0724-4, Equilibria s.r.o. Košice, 2011

[8] Polívka, J., Vostracký, Z., Píclová, P., Krutina, A., Šnajdr, J.: *Možnosti využití vyšší přenosové schopnosti vedení*, Sborník anotací a příspěvků semináře Efektivní energetika XII, strana 37-40, ISBN 978-80-248-2412-3, Technická univerzita Ostrava, 2011

[9] Polívka, J.: *Využití tepelného čerpadla pro chlazení fotovoltaického panelu*, Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010, strana 327-330, ISBN 978-80-214-4094-4, Technická univerzita Brno, 2010

[10] Polívka, J.: *Akumulace energie v systémech SMART GRIDS*, Sborník Elektrotechnika a informatika 2010, část Elektroenergetika, strana 61-64, ISBN 978-80-7043-915-9, ZČU Plzeň, 2010

[11] Polívka, J.: *Vytápění budov pomocí elektrické energie*, Sborník Elektrotechnika a informatika 2008, strana 67-70, ISBN 978-80-7043-703-2, ZČU Plzeň, 2008

Funkční vzorek

Systém pro měření účinnosti fotovoltaických panelů s využitím tepelného čerpadla, int. identifikace 22150-FV003-2011

Užitný vzor

Zařízení integrace fotovoltaického panelu a tepelného čerpadla, číslo užitného vzoru 26672

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1.1 Instalovaný výkon fotovoltaických elektráren na území ČR [6]	8
Obr. 2.1 Pásmová struktura p-n přechodu v křemíkovém solárním článku [2]	10
Obr. 2.2 Schématické znázornění světelných interakcí a toku fotoelektrického proudu v křemíkovém článku [3]	11
Obr. 2.3 Náhradní schéma FV článku [3]	13
Obr. 2.4 Maximální teoretická účinnost solárních článků v závislosti na šířce zakázaného pásma a teplotě [2]	16
Obr. 2.5 Porovnání dopadající sluneční energie na povrch atmosféry	18
Obr. 2.6 Sluneční spektrum při různém složení atmosféry [3]	18
Obr. 2.7 Průměrný roční úhrn doby trvání slunečního svitu [12]	19
Obr. 3.1 Teplotní skluz v logaritmickém p - h diagramu	23
Obr. 3.2 Různé typy kompaktních deskových pájených výměníků tepla	23
Obr. 3.3 Princip výparného procesu ve vzduchem ohřivaném výparníku (expanzní ventil, -10 °C na začátku výparníku, kapalné chladivo + 25 °C, přehřátá pára chladiva. Konec výparníku – 3 °C, -10 °C vypařování končí, přehřívání začíná)	24
Obr. 3.4 Pracovní cyklus rotačního kompresoru s valivým pístem	25
Obr. 3.5 Pracovní cyklus pístového kompresoru	25
Obr. 3.6 Pracovní cyklus scroll kompresoru (nasávání, výtlač, kompresní objem, pohyblivá spirála, pevná spirála)	26
Obr. 3.7 Řez dvojitým rotačním kompresorem	27
Obr. 3.8 Ukázka a složení deskového výměníku	28
Obr. 3.9 Procesy ve vzduchem chlazeném kondenzátoru	29
Obr. 3.10 Termostatický expanzní ventil TEV	30
Obr. 3.11 Ukázka principu termostatického expanzního ventilu	31
Obr. 3.12 Termodynamický okruh pro chladivo R 407 C (1 – vstup do kompresoru,	32
Obr. 4.1 Konstrukční schéma měřicího modelu	33
Obr. 4.2 Umístění FV panelů v chladicím prostoru	33
Obr. 4.3 Umístění výparníku	34
Obr. 4.4 Kapilární trubice (nejjednodušší expanzní ventil)	34
Obr. 5.1 Zapojení měřicí úlohy	36
Obr. 5.2 Měřicí přístroj Keithly 2700	36

Obr. 5.3 Řez FV panelem	37
Obr. 6.1 Odečtené teplotní parametry jednotlivých částí modelu při měření se zatěžovacím odporem 200 Ω	38
Obr. 6.2 Napěťové a proudové poměry monokrystalického panelu v závislosti na teplotě při měření se zatěžovacím odporem 200 Ω	38
Obr. 6.3 Naměřený výkon a dopočítaný poměrný výkon vztažený k teplotě panelu 20 °C při měření se zatěžovacím odporem 200 Ω	39
Obr. 6.4 Odečtené teplotní parametry jednotlivých částí modelu při měření se zatěžovacím odporem 1000 Ω	39
Obr. 6.5 Napěťové a proudové poměry monokrystalického panelu v závislosti na teplotě při měření se zatěžovacím odporem 1000 Ω	40
Obr. 6.6 Naměřený výkon a dopočítaný poměrný výkon vztažený k teplotě panelu 20 °C při měření se zatěžovacím odporem 1000 Ω	40
Obr. 6.7 Odečtené teplotní parametry jednotlivých částí modelu při měření se zatěžovacím odporem 1500 Ω	41
Obr. 6.8 Napěťové a proudové poměry monokrystalického panelu v závislosti na teplotě při měření se zatěžovacím odporem 1000 Ω	41
Obr. 6.9 Naměřený výkon a dopočítaný poměrný výkon vztažený k teplotě panelu 20 °C při měření se zatěžovacím odporem 1500 Ω	42
Obr. 6.10 Odečtené teplotní parametry jednotlivých částí modelu při měření se zatěžovacím odporem 2100 Ω	42
Obr. 6.11 Napěťové a proudové poměry monokrystalického panelu v závislosti na teplotě při měření se zatěžovacím odporem 2100 Ω	43
Obr. 6.12 Naměřený výkon a dopočítaný poměrný výkon vztažený k teplotě panelu 20 °C při měření se zatěžovacím odporem 2100 Ω	43
Obr. 6.13 Teplotní závislost poměrného výkonu monokrystalického FV panelu pro jednotlivá zatížení.....	44
Obr. 6.14 Výkon monokrystalického panelu při různém zatížení vztažený k teplotě panelu 13 °C	44
Obr. 6.15 Teplotní závislost výkonu amorfního FV panelu pro jednotlivá zatížení	45
Obr. 7.1 Oteplení FV článku v závislosti na intenzitě slunečního osvětlení.....	51
Obr. 8.1 Návrh zapojení topného zdroje a FV elektrárny na bytovém domě.....	53

Obr. 9.1 Závislost topného výkonu kaskády tepelných čerpadel 2x Convert AW28-3P a tepelné ztráty bytového domu na venkovní teplotě,	55
Obr. 9.2 Uvažovaná ekvitermní křivka topného zdroje	55
Obr. 9.3 Závislost topného faktoru tepelných čerpadel pro vytápění a výrobu TUV na venkovní teplotě při respektování ekvitermní křivky	56
Obr. 9.4 Závislost naměřených vstupních hodnot a tepelné ztráty na venkovní teplotě, a) zimní provoz, b) letní provoz.....	57
Obr. 9.5 Výkonové poměry na kaskádě TČ, a) zimní provoz, b) letní provoz	58
Obr. 9.6 Pokrytí topného výkonu fotovoltaického panelu chladicím výkonem tepelného čerpadla, a) zimní provoz, b) letní provoz.....	59
Obr. 9.7 Porovnání teoretického množství vyrobené energie FV panelem v průběhu dne, a) v zimním období, b) v letním období	60
Obr. 9.8 Porovnání topných faktorů bez a s přehříváním výparníku, a) v zimním období, b) v letním období	61
Obr. 9.9 Rovnovážný stav $P_{sol,tep} \approx P_c, T_{Č}$	62
Obr. 9.10 Chladicí výkon TČ je výrazně vyšší než topný výkon FV $P_{sol,tep} \ll P_c, T_{Č}$	62
Obr. 9.11 Bezpečnostní opatření proti přehřátí výparníku $P_{sol,tep} \gg P_c, T_{Č}$	63
Tabulka 2.1 Energie zakázaného pásma a rozsahy vlnových délek jednotlivých typů FV článků [3]	13
Tabulka 4.1 Parametry monokrystalického a amorfního FV panelu.....	34
Tabulka 7.1 Tepelná kapacita panelu (data z BP Solar - BP 582)	47
Tabulka 8.1 Vstupní údaje pro výpočet energetické náročnosti budovy.....	52
Tabulka 8.2 Dimenzování kaskády tepelných čerpadel	52
Tabulka 8.3 Provozní požadavky na ohřev užitkové vody.....	53
Tabulka 8.4 Uvažované parametry FV elektrárny	53
Tabulka 9.1 Přehled výroby elektrické energie z FV elektrárny a spotřeby tepelného čerpadla a záložního zdroje před a po provedení uvažovaných opatření	63
Tabulka 9.2 Ekonomické zhodnocení provozu	64

Seznam použitých značek a indexů

E	šířka zakázaného pásma
\hbar	Planckova konstanta
f	frekvence
c	rychlost světla
λ	vlnová délka světla
I_S	celkový oddělený náboj
I_j	proud rozptýlený na p-n přechodu
I_{load}	proud zátěží
R_j	rozptylová rezistence p-n přechodu
R_S	sériový odpor FV článku
R_{load}	odpor zátěže
U_{load}	napětí na zátěži, resp. na článku
N	podíl absorbovaných fotonů
α	absorpční koeficient
d	tloušťka krystalu
N_{ph}	celkové množství fotonů dopadajících na plochu článku
I_P	intenzita slunečního záření
η_{max}	maximální účinnost panelů
n	pořadový den roku
ϑ_z	úhel zenitu
ϕ	zeměpisná šířka
δ	deklinace ω hodinový úhel
ω	hodinový úhel
t	místní čas v hodinách
ω_S	úhel západu slunce indikující délku dne
ε	topný faktor (COP)
Q_u	energie získaná z termodynamického cyklu
P_e	elektrická energie dodaná do termodynamického cyklu
m	průtočné množství chladiva
Q_c	teoretická tepelná kapacita
Q_o	teoretická chladicí kapacita
P	teoretický příkon kompresoru
h	enthalpie
$TZ_{výp}$	tepelná ztráta objektu
T_e	venkovní výpočtová teplota
T_i	vnitřní výpočtová teplota
$V_{TUV,den}$	denní spotřeba užitkové vody
$Q_{TUV,den}$	denní energetická náročnost ohřevu užitkové vody
P_{EK}	záložní elektrokotel o výkonu
V_{TUV}	velikost zásobníků TUV
P_{TUV}	požadovaný výkon pro výrobu TUV

t_{TUV}	doba ohřevu užitkové vody
S_{FV}	absorpční plocha panelů
η_{teor}	teoretická elektrická účinnost při teplotě panelu
$\eta_{tepelná}$	teoretický podíl dopadající energie přeměněný na teplo
η_{odraz}	teoretický podíl odražené energie
$\eta_{prostup}$	teoretický podíl prostupující energie
Q_{vzd}	požadovaný průtok vzduchu výparníkem tepelného čerpadla
C_{vzd}	měrná tepelná kapacita vzduchu
T_{AVG}	průměrná teplota
COP_{AVG}	průměrná hodnota topného faktoru
E_{FV}	vyrobená elektrická energie FV elektrárnou bez chlazení
$E_{FV,CH}$	vyrobená elektrická energie FV elektrárnou s chlazením
$W_{TČ}$	spotřeba elektrické energie tepelného čerpadla bez přehřevu výparníku TČ
$W_{TČ,CH}$	spotřeba elektrické energie tepelného čerpadla s přehřevem výparníku TČ
W_{EK}	spotřeba elektrické energie záložního zdroje bez přehřevu výparníku TČ
$W_{EK,CH}$	spotřeba elektrické energie záložního zdroje s přehřevem výparníku TČ